

[Send to Printer](#) [Close Window](#)


Search result: 1 of 1

(WO/1997/045747) ELECTRO-OPTICAL AND MAGNETO-OPTICAL SENSING APPARATUS AND METHOD FOR CHARACTERIZING FREE-SPACE ELECTROMAGNETIC RADIATION

Biblio. Data	Description	Claims	Documents
--------------	-------------	--------	-----------

Latest published bibliographic data

Publication No.: WO/1997/045747

Publication Date: 04.12.1997

International Application No. PCT/US1997/009151

International Filing Date: 30.05.1997

Int. Class.⁶: G01R 31/00.

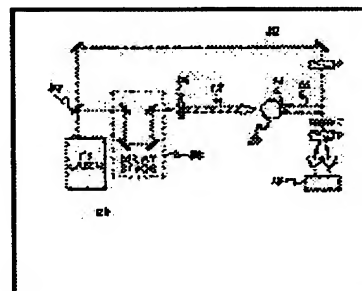
Applicant: RENSSELAER POLYTECHNIC INSTITUTE.

Inventor: ZHANG, Xi-Cheng LIBELO, Louis, Francis WU, Qi RIORDAN, Jenifer, Ann SUN, Feng-Guo.

Priority Data: 60/018,844 31.05.1996 US

Title: (EN) ELECTRO-OPTICAL AND MAGNETO-OPTICAL SENSING APPARATUS AND METHOD FOR CHARACTERIZING FREE-SPACE ELECTROMAGNETIC RADIATION
(FR) DISPOSITIF ELECTRO-OPTIQUE ET MAGNETO-OPTIQUE ET PROCEDE POUR DECELER LE RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE DANS L'ESPACE LIBRE

Abstract: (EN) Apparatus and method for characterizing free-space electromagnetic energy, suitable for real-time two-dimensional far-infrared imaging applications. The sensing technique is based on a non-linear coupling between a low-frequency electric or magnetic field (12) and a laser beam (16) in an electro-optic or magnetic-optic crystal (14, 32 or 54). A counter-propagating sensing technique (Fig. 1), and a co-linear sensing technique (Figs. 4 and 13) are described for longer radiated and optical beam interaction length, making imaging applications practical.



(FR) L'invention concerne un dispositif et un procédé pour déceler le rayonnement électromagnétique dans l'espace libre, se prêtant aux applications d'imagerie bidimensionnelle en temps réel dans l'infrarouge lointain. La technique de détection repose sur un couplage non linéaire entre un champ électrique ou magnétique basse fréquence (12) et un faisceau laser (16) dans un cristal électro-optique ou magnéto-optique (14, 32 ou 54). Outre une technique de détection à contre-propagation (Fig. 1), on décrit une approche de détection colinéaire (Figs. 4 et 13) offrant une plus grande longueur d'interaction entre le champ rayonné et le faisceau optique, ce qui facilite les applications d'imagerie.

Designated
States: CA, JP, AT, BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE.

(19) 自本国特許庁 (J P)

(12) 公表特許公報 (A)

(11) 特許出願公表番号

特表2000-514549

(P2000-514549A)

(43) 公表日 平成12年10月31日 (2000. 10. 31)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テームト* (参考)
G 0 1 R 33/032		G 0 1 R 33/032	
G 0 1 J 4/00		G 0 1 J 4/00	
G 0 1 N 21/21		G 0 1 N 21/21	A
			Z
G 0 1 R 29/08		G 0 1 R 29/08	F
		審査請求 有	予備審査請求 有 (全 64 頁)

(21) 出願番号 特願平9-542939
 (86) (22) 出願日 平成9年5月30日 (1997. 5. 30)
 (85) 翻訳文提出日 平成10年11月30日 (1998. 11. 30)
 (86) 国際出願番号 P C T / U S 9 7 / 0 9 1 5 1
 (87) 国際公開番号 W O 9 7 / 4 5 7 4 7
 (87) 国際公開日 平成9年12月4日 (1997. 12. 4)
 (31) 優先権主張番号 6 0 / 0 1 8 , 8 4 4
 (32) 優先日 平成8年5月31日 (1996. 5. 31)
 (33) 優先権主張国 米国 (U S)
 (31) 優先権主張番号 0 8 / 7 3 9 , 0 9 9
 (32) 優先日 平成8年10月25日 (1996. 10. 25)
 (33) 優先権主張国 米国 (U S)

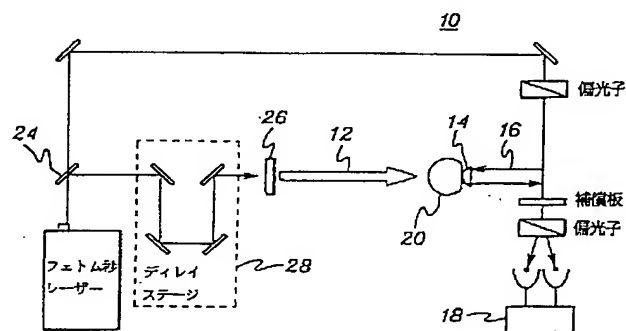
(71) 出願人 レンセレー ポリテクニク インスティテュート
 アメリカ合衆国, 12180-3590 ニューヨーク州, トロイ, エイトス ストリート 110
 (72) 発明者 ジャン, シーチェン
 アメリカ合衆国, 12110 ニューヨーク州, レーザム, オメガ テラス 31
 (72) 発明者 リベロ, ルイス, フランシス
 アメリカ合衆国, 20817 メリーランド州, ベセスダ, ブルズ ラン パークウェイ 9413
 (74) 代理人 弁理士 吉岡 宏嗣 (外2名)

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 自由空間の電磁放射を特徴づけるための電気光学及び磁気光学感知装置及び方法

(57) 【要約】

リアルタイム2次元遠赤外画像用途に適した、自由空間電磁エネルギーを特徴づける装置と方法。感知手法は、低周波数電場または磁場 (1 2) と、電気光学または磁気光学結晶 (1 4, 3 2 または 5 4) のレーザービーム (1 6) との間の非線形接続に基づいている。逆方向伝搬感知手法 (図 1)、及び共線形感知手法 (図 4 と 1 3) が、長い放射及び光学ビームの相互作用距離について述べられており、画像の適用を現実的なものになっている。



22

fig. 1

【特許請求の範囲】

1. 自由空間電磁場を特徴づける電気光学センサーであり、

電磁場が通過し、それにより、その屈折率を変化するように、位置付けられた電気光学結晶と、

通過する自由空間電磁場と同期して電気光学結晶に当たるような光学プローブ信号の発生手段と、

電気光学結晶当たった後、光学プローブ信号の楕円変調を決定する感知手段と、

光学プローブ信号の楕円変調を評価することにより、自由空間電磁場を特徴づける手段とからなる前記電気光学センサー。

2. 前記特徴づける手段が、光学プローブ信号の楕円変調を分析することにより、電気光学結晶の屈折率の変化を決定する手段を含んでなることを特徴とする請求項1に記載の電気光学センサー。

3. 前記発生手段により発生した前記光学プローブ信号が、偏光した光学プローブ信号からなることを特徴とする請求項1に記載の電気光学センサー。

4. 自由空間電磁場が自由空間電磁放射からなり、そして、前記発生手段が、光学プローブ信号を電気光学結晶へ、電気光学結晶を同期して通過する前記自由空間電磁放射の方向と反対の伝搬方向へ当てて手段を有することを特徴とする請求項1に記載の電気光学センサー。

5. 前記光学プローブ信号が、電気光学結晶内で全反射を受け、そして、電気光学結晶を通過する自由空間電磁放射の伝搬の方向と平行な結晶内の速度成分を有し、前記速度成分が、電気光学結晶を通過する自由空間電磁放射の速度にほぼ等しいことを特徴とする請求項4に記載の電気光学センサー。

6. 前記自由空間電磁放射がテラヘルツビームからなり、そして、前記光学プローブ信号が光学的パルスからなることを特徴とする請求項5に記載の電気光学センサー。

一。

7. 前記電気光学結晶がZnTe結晶、GaAs結晶、CdTe結晶、CdZn

Te 結晶、及び有機DAST結晶の1つからなることを特徴とする請求項6に記載の電気光学センサー。

8. 自由空間電磁場が自由空間電磁放射からなり、そして、前記特徴づける手段が、自由空間電磁放射の振幅と位相の両方を光学プローブ信号の楕円変調から決定する手段を含んでなることを特徴とする請求項1に記載の電気光学センサー。

9. 前記発生手段が、通過する自由空間電磁場と共線形に電気光学結晶に当たるような光学プローブ信号の送出手段を含んでなることを特徴とする請求項1に記載の電気光学センサー。

10. 自由空間電磁場がテラヘルツビームからなり、そして、前記発生手段により発生した前記光学プローブ信号が、偏光された光学プローブ信号からなることを特徴とする請求項9に記載の電気光学センサー。

11. 前記電気光学結晶が、ZnTe結晶、GaAs結晶、CdTe結晶、CdZnTe結晶、及び有機DAST結晶の1つからなることを特徴とする請求項10に記載の電気光学センサー。

12. 前記自由空間電磁場が、10ギガヘルツ～5テラヘルツの範囲の帯域幅からなるサブピコ秒の自由空間電磁放射からなることを特徴とする請求項1に記載の電気光学センサー。

13. 自由空間放射を特徴づける装置であり、

自由空間放射の少なくとも一部が通過するように位置付けられた電気光学結晶で、ポッケルス効果により通過する自由空間放射によって変化した屈折率と偏光を有する前記電気光学結晶と、

通過する前記自由空間放射と同期した前記電気光学結晶により屈折するように配向された偏光光学プローブ信号の発生手段で、前記光学プローブ信号が、電気光学

結晶の屈折率と偏光の前記変化をサンプリングする前記発生手段と、

電気光学結晶の屈折率と偏光の変化により自由空間放射の特徴の情報を提供するような前記光学的サンプルの処理手段とからなることを特徴とする装置。

14. 前記処理手段が、電気光学結晶の屈折率と偏光の変化を用い、自由空間放

射の位相と自由空間放射の振幅とをコヒーレントで定量化する手段からなることを特徴とする請求項13に記載の装置。

15. 電気光学結晶を通過する偏光光学プローブ信号の速度成分が、電気光学結晶を通過する自由空間放射の伝搬方向とほぼ平行であり、そして、前記発生手段が、さらに、前記速度成分を電気光学結晶を通過する自由空間放射の速度に速度整合する手段からなることを特徴とする請求項13に記載の装置。

16. 前記発生手段が、通過する自由空間放射と共線形に電気光学結晶に当てるような光学プローブ信号の送出手段からなることを特徴とする請求項13に記載の装置。

17. さらに、電気光学結晶と自由空間放射源との間に位置付けられたレンズからなり、前記レンズが、前記自由空間放射を前記電気光学結晶内に焦点を合わせること特徴とする請求項13に記載の装置。

18. 自由空間放射が与えられた方向へ伝搬し、前記電気光学結晶が自由空間放射の前記与えられた方向と垂直な少なくとも 1 cm^2 の表面積を有してなることを特徴とする請求項13に記載の装置。

19. 対象物を結像する画像システムであり、

電磁放射ビームの発生手段で、前記電磁放射ビームが結像される対象物を通過するように位置付けられている前記発生手段と、

電磁放射ビームが、対象物を通過して後、電気光学結晶を通過するように位置付けられた電気光学結晶で、前記電磁放射ビームが前記電気光学結晶の屈折率を変化する前記電気光学結晶と、

通過する電磁放射と同期して電気光学結晶に当たるような光学プローブ信号の発生手段と、

電気光学結晶に当たった後、光学プローブ信号の楕円変調を決定する感知手段と、

電磁放射ビームを特徴づけるための光学プローブ信号の楕円変調の評価手段と、

前記電磁放射ビームの前記特徴づけにより、前記対象物の画像を表示する手段

とからなる画像システム。

20. 前記電磁放射ビームが自由空間テラヘルツビームからなることを特徴とする請求項19に記載の画像システム。

21. 前記テラヘルツビームが電気光学結晶の幅に少なくとも等しい幅を有することを特徴とする請求項20に記載の画像システム。

22. 前記テラヘルツビームの幅が電気光学結晶の幅より大きく、そして、画像システムが、さらに、テラヘルツビームを電気光学結晶へ焦点を合わせるレンズデバイスからなることを特徴とする請求項21に記載の画像システム。

23. 前記評価手段が、さらに、電気光学結晶を通過する電磁放射ビームの位相と振幅の両方をコヒーレントで定量化する手段からなることを特徴とする請求項19に記載の画像システム。

24. 電気光学結晶に当たる光学プローブ信号の速度成分が、電気光学結晶を通過する電磁放射ビームの伝搬方向とほぼ平行であり、そして、前記光学プローブ信号の前記発生手段が、さらに、前記速度成分を電気光学結晶を通過する電磁放射ビームの速度と速度整合する手段からなることを特徴とする請求項19に記載の画像システム。

25. 光学プローブ信号の前記発生手段が、通過する電磁放射ビームと共線形に電気光学結晶に当たるような光学プローブ信号の送出手段からなることを特徴とする請求項19に記載の画像システム。

26. 電磁放射ビームが、テラヘルツビームからなり、そして、前記電気光学結晶

がZnTe結晶、GaAs結晶、CdTe結晶、CdZnTe結晶、及び有機DAST結晶の1つからなることを特徴とする請求項19に記載の画像システム。

27. 自由空間磁場を特徴づける磁気光学センサーであり、

自由空間磁場が通過し、その屈折率を変化するように位置付けられた磁気光学結晶と、

通過する自由空間磁場と同期して磁気光学結晶に当たるような光学プローブ信号の発生手段と、

磁気光学結晶に当たった後、光学プローブ信号の楕円変調を決定する感知手段と、

光学プローブ信号の楕円変調を評価することにより自由空間磁場を特徴づける手段とからなる磁気光学センサー。

28. 前記特徴づける手段が、光学プローブ信号の楕円変調を分析することにより磁気光学結晶の屈折率の変化を決定する手段を含んでなることを特徴とする請求項27に記載の磁気光学センサー。

29. 前記発生手段により発生された前記光学プローブ信号が偏光された光学プローブ信号からなることを特徴とする請求項27に記載の磁気光学センサー。

30. 前記自由空間磁場がテラヘルツビームからなり、そして、前記光学プローブ信号が光学的パルスからなることを特徴とする請求項27に記載の磁気光学センサー。

31. 前記磁気光学結晶が、タビウム-ガリウムガーネットの結晶からなることを特徴とする請求項27に記載の磁気光学センサー。

32. 自由空間磁場が自由空間電磁放射からなり、そして、前記特徴づける手段が、自由空間電磁放射の振幅と位相の両方を光学プローブ信号の楕円変調から決定する手段を含んでなることを特徴とする請求項27に記載の磁気光学センサー。

33. 前記発生手段が、通過する磁場の配向と平行に磁気光学結晶に当たるような光学プローブ信号の送出手段を含んでなることを特徴とする請求項27に記載の磁

気光学センサー。

34. 自由空間磁場がテラヘルツビームからなり、そして、前記発生手段により発生された前記光学プローブ信号が、偏光された光学プローブ信号からなることを特徴とする請求項33に記載の磁気光学センサー。

35. 自由空間放射の磁気成分を特徴づける装置であり、

自由空間放射の少なくとも一部が通過するように位置付けられた磁気光学結晶で、ファラデー効果により、通過する自由空間放射のために変化した屈折率と偏

光を有する前記磁気光学結晶と、

前記磁気光学結晶により屈折するように配向された偏光プローブ信号を、通過する自由空間放射と同期して発生する手段で、前記光学プローブ信号が、磁気光学結晶の屈折率と偏光の変化を光学的にサンプリングする前記発生手段と、

自由空間放射の磁気成分を、磁気光学結晶の屈折率と偏光の変化により特徴づけるための前記光学的サンプルの処理手段とからなる装置。

36. 前記処理手段が、磁気光学結晶の屈折率と偏光の変化により、自由空間放射の位相と自由空間放射の振幅の両方をコヒーレントで定量化する手段からなることを特徴とする請求項35に記載の装置。

37. 磁気光学結晶を通過する偏光された光学プローブ信号が、磁気光学結晶を通過する自由空間放射の伝搬方向とほぼ垂直であることを特徴とする請求項35に記載の装置。

38. 前記発生手段が、通過する自由空間放射の磁気成分と平行に磁気光学結晶に当たるような光学プローブ信号の送出手段からなることを特徴とする請求項35に記載の装置。

39. さらに、磁気光学結晶と自由空間放射源との間に位置づけられたレンズからなり、そして、前記レンズが、前記自由空間放射を前記磁気光学結晶内に焦点を合わせることを特徴とする請求項35に記載の装置。

40. 対象物を結像する画像システムであり、

磁気成分を有する放射ビームの発生手段で、前記放射ビームが結像される対象物を通過するように位置付けられている前記発生手段と、

放射ビームが、対象物を通過した後、磁気光学結晶を通過するように位置付けられた結晶で、前記放射ビームが前記磁気光学結晶の屈折率を変化させる前記磁気光学結晶と、

通過する放射ビームと同期して磁気光学結晶に当たるような光学プローブ信号の発生手段と、

磁気光学結晶に当たった後、光学プローブ信号の楕円変調を決定する感知手段と、放射ビームの磁気成分を特徴づけるための光学プローブ信号の楕円変調の評

価手段と、

放射ビームの前記磁気成分の前記特徴づけにより前記対象物の画像を表示する手段とからなるシステム。

41．前記磁気放射ビームが自由空間テラヘルツビームからなることを特徴とする請求項40に記載の画像システム。

42．前記テラヘルツビームが磁気光学結晶の幅と少なくとも等しい幅を有することを特徴とする請求項41に記載の画像システム。

43．前記テラヘルツビームの幅が、磁気光学結晶の幅より大きく、そして、画像システムが、さらに、テラヘルツビームを磁気光学結晶へ焦点を合わせるレンズデバイスからなることを特徴とする請求項42に記載の画像システム。

44．前記評価手段が、さらに、磁気光学結晶を通過する放射ビームの位相と振幅の両方をコヒーレントで定量化する手段からなることを特徴とする請求項40に記載の画像システム。

45．磁気光学結晶に当たる光学プローブ信号が、磁気光学結晶を通過する放射ビームの伝搬方向とほぼ垂直であることを特徴とする請求項40に記載の画像システム。

ム。

46．光学プローブ信号の前記発生手段が、通過する放射ビームの磁気成分と平行に磁気光学結晶に当たるような光学プローブ信号の送出手段からなることを特徴とする請求項40に記載の画像システム。

【発明の詳細な説明】

自由空間の電磁放射を特徴づけるための
電気光学及び磁気光学感知装置及び方法

技術分野

本発明は、自由空間の電磁場をコヒーレントで特徴づけるための装置と方法に関し、特に、リアルタイム2次元遠赤外面像の用途に適した装置と方法に関する。

背景技術

超高速電子装置と光電子装置の集合体、特に、投光されたテラヘルツ光線の部分電場において、自由に伝搬するピコ秒のマイクロ波とミリ波の信号の検出は、主に、光導電アンテナと遠赤外コヒーレント計測法により行われる。例えば、ヒューとヌス著による題名“テラヘルツ波による画像”、光学レター、20巻、16号、1995年8月(“Imaging With Terahertz Waves,” Optics Letters, Vol. 20, No. 16, August 1995)を参照のこと。

光導電アンテナは、良好な検出応答性を有し、その信号ノイズ比は、一般に、液体ヘリウム冷却のボロメーターより遥かに優れている。その上、ダイポール距離が短い光導電アンテナの検出帯域幅は、5テラヘルツを超える。しかし、これらのアンテナ方式の検出器の問題点は、ヘルツのダイポール構造の共振作用である。このタイプの構造は、ダイポール距離の2倍の共振波長を有し、そのため、共振検出器の応答関数からなる信号波形は、入ってくるテラヘルツと光学的ゲートパルスの単純な相互相関ではない。光学的ゲートとアンテナの幾何学的配置における光キャリアの有限な寿命により制約される光導電アンテナの時間的分解が、100フェトム秒より低下しても、測定された信号は、実際のテラヘルツ波形を正確に表示しない。

比較において、遠赤外コヒーレント計測法が、テラヘルツパルスの自己相関をもたらすけれども、重要な位相情報は失われている。フォトンどの場というものに相互に関連する用途において、振幅と位相を含む、全テラヘルツの波形の知識は、重要である。従って、多様な進歩した科学技術での用途を支えるために、引

き続き、さらに適切な感知装置の発展の必要性がある。

電気光学サンプリングは、ピコ秒の過渡的信号の測定に特に適している。このようなサンプリングは、“局所電場”測定 of 技術に適用されており、この技術は、フォトダイオード、集積回路、及び電氣的刺激と電氣的出力、または、光学的刺激と電氣的出力により発生した信号の測定からなっている。これらの“局所電場”電気光学サンプリング装置は、例えば、米国特許No. 4,618,819、4,910,458及び5,406,194に記載されており、一般に、ポッケルス効果を利用している。ポッケルスデバイスは、加えられた電場の関数として変化する複屈折の性質を有する電気光学結晶と言われているものである。

電気光学結晶は、以下のような“局所電場”コンテキストにおいて使用されている。一連の光学的パルスが発生源から送られ、サンプリングビームと刺激ビームの2つの経路へに分割される。このような発生源の1つは、可視波長ピコ秒のレーザーである。第1の経路の光学的パルスは、測定される電氣的信号の発生を誘発する。第2の経路の光学的サンプリングパルスが、伝搬されることにより、この電氣的信号は、電気光学結晶に影響するように接続される。この結晶は、第1と第2の交差した偏光子の間の光路にある。電場に発生した複屈折は、サンプリングビームの偏光を変える。偏光分析後のサンプリングビームの光度は、検出器、例えば、速度の遅いフォトダイオードにより測定され、それは、個々のパルスを分解する必要はない。

検出器の出力は、それを利用する手段へ送られる。刺激ビームのパルスの変調を表す電氣的出力と同様に、検出器からの電氣的出力は、サンプリングされた電氣的

信号の振幅に比例するDC出力を刺激ビームの変調と同一位相で発生するロックイン増幅器へ、最初に接続される。表示は、表示器と同期した可変遅延線路の出力に対する連続的なパルス周期の間のロックイン増幅器の出力をプロットすることにより、形成される。電気光学サンプリングの基本理論は、バラドマニス (Vladamamis) ムーロー (Mourou) 著の“電気光学サンプリング：テストピコ秒電子装置”、レーザー焦点／電気光学誌、84頁、1986年2月 (“Electro-Optic

Sampling: Testing Picosecond Electronics, "Laser Focus/Electro-Optics, p. 84, February, 1986) と、バラドマニス (Vladmanis)、ムーロー (Mourou)、及びガベル (Gabel) 著、量子電子工学の I E E E 誌、Q E - 19、4 巻、664 頁、1983 年 4 月 (I E E E Journal of Quantum Electromcs, Vol. Q E -19, 4, p. 664, April 1983) に説明されている。時間的要素をピコ秒程度で有する信号を測定する有効な電気光学サンプリングは、バラドマニス、ムーローに付与された米国特許 No. 4, 446, 425 に開示されている。

電気光学サンプリングの一般的実施例において、電気光学サンプリングは、3 つの部分からなる試験設備に具体化されている。これらは、金属またはセラミックスの支持体、光導電スイッチ、及び電気光学結晶である。支持体は、能動デバイスの機械的支持を行う。能動デバイスはそれ自体が電気光学結晶、光導電スイッチ、及び試験中のデバイスからなっている。電気的接続は、試験中のデバイスからバイアス回路網へなされているのと同様に、スイッチと結晶の導波路へ典型的な金結線でなされている。

動作モードにおいて、光導電スイッチはそれへ加えられた適切なバイアスを有する。スイッチが前述の刺激ビームにより刺激されると、電気的パルスが、ピコ秒の立ち上がりで導波路へ送り出される。これは、試験中のデバイスを刺激、つまり起動する刺激信号である。試験中のデバイスは、電気的出力パルスを発生し、続いて、結晶面上の導波路へ送り出され、そこで、電場が電気光学結晶の複屈折を発生し、

光学的パルスの第 2 の連続によりサンプリングされる。

“局所電場” 特徴を定量化する良い性能を有するとしても、技術的周知の、そして、ここで要約されている電気光学サンプリングは、これまで、自由空間放射の特徴づけを行なうことが出来なかった。これは基本的に、局所電場と自由空間の電磁波の性質が異なるためである。

従って、自由空間放射をサンプリングできる、実用的な電気光学サンプリング装置と方法の技術の必要性、特に、リアルタイムの 2 次元遠赤外画像用途野多目に適するものの必要性がある。

発明の開示

簡単に要約すると、本発明は、1つの態様において、自由空間の電磁場を特徴づける電気光学センサーからなる。このセンサーは、自由空間の電磁場が通り、結晶の屈折率を変化するように位置付けられた電気光学結晶を有する。光学プローブ信号が発生して、通過する自由空間電磁場と同期して電気光学結晶に突き当たり、これにより、光学プローブ信号は、結晶を通過する電磁エネルギーを表す情報を集める。感知手段が、光学プローブ信号の楕円変調を決定して、結晶を通った後の光学プローブ信号を検出するために備えられている。次に、処理手段が、光学プローブ信号のこの楕円変調を評価することにより、自由空間の電磁エネルギーを特徴づける。

1つの実施形態において、逆方向伝搬システムが提示されており、この装置では、光学プローブ信号が、結晶を通過する自由空間の電磁場の方向と反対の方向へ入った後、結晶内で全反射を行う。別の実施形態では、光学プローブ信号は、2つの信号の間の相互作用距離を高めるために、結晶を通る自由空間の電磁エネルギーと共線的に向けられる。画像の用途は、光学プローブ信号と結晶を通過する自由空間の電磁エネルギーのこの共線的配置を採用することにより提供される。

本発明は、別の態様において、自由空間の磁場を特徴づけるための磁気光学センサーからなる。このセンサーは、自由空間の磁場が通過して、結晶の屈折を変化するように配置された磁気光学結晶を有する。光学プローブ信号が発生し、結晶を通過する自由空間の磁場と同期して、磁気光学結晶に突き当たり、これにより、光学プローブ信号は、結晶を通過する磁場を表す情報を集める。感知手段が、光学プローブ信号の楕円変調を決定して、結晶を通過した後の光学プローブ信号を検出するために備えられている。次に、処理手段が、光学プローブ信号のこの楕円変調を評価することにより、自由空間の磁気エネルギーを特徴づける。

自由空間の電磁場を特徴づけるために、電気光学的感知法として主に述べているが、本発明は、また、自由空間の磁場を特徴づけるために、前に要約した磁気光学的感知法を含んでいることを理解されるであろう。

多くの利点が、これまでのすべての感知法と比較して、ここに呈示された斬新な装置と方法に内在している。テルル化亜鉛（ZnTe）プローブによる予備データは、回折が限定された空間分解、フェトム秒の時間分解（177-フェトム秒パルス持続）を示しており、5テラヘルツ帯域幅が達成される。検出幾何学的配置の単純化、空間的な並列処理の可能性、及び達成される優れた信号ノイズ比（ $\geq 10,000$ ）は、本発明による装置／方法をリアルタイムの2次元サブピコ秒遠赤外画像用途に適したものにしている。

電場センサーの領域は、結晶の面積により設定され、従って、本技術は、並列光学処理を本来行うことができる。本方法は、CCD及びDSPの技術と併用可能である。電場センサー装置は、光導電ダイポールアンテナの共振構造により現在の技術に内在するこれまでの制約を排除する。DCから第1の音響共振周波数（一般に数テラヘルツ）への一様な周波数応答性が達成可能であり、これにより、極端に広い帯域周波数応答を発生する。

本発明によるセンサーは、広い温度変化、例えば、 $-250^{\circ}\text{C} \sim +200^{\circ}\text{C}$ で使

用できる。電磁場センサーは、セットアップが容易であり、焦点合わせ部材を必要としない。実質的に、電磁場の摂動は、感知装置により発生しない。このセンサーは、100,000,000パワーダイナミックレンジを有する。電極または配線は必要なく、そして、デバイスはテラヘルツ電場画像に使用できる。

検出器の領域は、センサー結晶の領域であり、これは、GaAsセンサー結晶が使用されるならば、4インチの大きさであるか、または、単一のビーム用途の場合は、 $50\mu\text{m}$ 程度に小さい。重ねて言えば、より大きいサイズは、遠赤外画像に適している。電気光学センサー板は、DC～数テラヘルツの範囲の帯域幅内の自由伝搬する電磁波の振幅と位相の両方を測定する。

電場センサー装置の感度は、電気光学係数及び光学ビームと電磁ビームとの間の相互作用距離により設定される。電場センサーは、強いプローブビーム出力を必要とせず、そして、光学プローブビームのための従来のフォトダイオード検出器を用いることにより、プローブビーム出力は、 $10\text{nW} \sim 10\text{mW}$ の間で変化

し、これは、すべての現存する光学電子技術より顕著に低い。最後に、有機材料を、検出感度を高めるためにセンサーヘッドに使用してもよい。

図面の簡単な説明

本発明に係る課題は、明細書の最後の部分で、詳細に指摘され、明確にクレームされている。しかし、本発明は、さらに別の目的と利点と共に、実際の構成と方法の両方に関し、添付図面との関連で、以降の詳細な説明を参照することにより十分に理解されるであろう。

図1は、自由空間放射をサンプリングする、本発明による電気光学サンプリング装置の1つの実施態様の図を示しており、光学プローブパルスが、自由空間放射に対し逆方向伝搬している。

図2は、図1の放射ビーム、焦点合わせレンズ、電気光学結晶、及びサンプリング

パルス成分の拡大図である。

図3は、電気光学信号強度に対するタイムディレイのプロットからなる、非バイアスGaAs放出体からの過渡波形のグラフである。

図4は、本発明による自由空間サンプリング装置の別の実施形態を示しており、放射が電気光学結晶を通過するとき、光学プローブパルスは、自由空間放射と共線的である。

図5は、光導電アンテナからの時間的電気光学信号のグラフである。

図6は、電気光学アンテナからの電気光学信号の周波数スペクトルのグラフであり、スペクトルは、20ギガヘルツの中心周波数と6.3ギガヘルツの3dB帯域幅を有する。

図7は、GaPセンサーにより測定された光整流からの時間的電気光学信号のグラフである。

図8は、図7に示された時間的信号の周波数スペクトルのグラフである。

図9は、電気光学信号（ピーク～ピーク）に対する光学的ポンピング出力のプロットである。

図10は、電気光学信号（ピーク～ピーク）に対する光学プローブ出力（平均

) のグラフである。

図11は、ZnTeセンサーにより測定された代表的な時間的波形のグラフである。

図12は、電気光学信号強度に対する光学的励起出力のグラフである。

図13は、本発明による電気光学サンプリング装置の別の実施形態を示しており、放射が電気光学結晶を通過するとき、光学プローブパルスは、同様に、自由空間放射と共線的である。

図14は、本発明による、厚さ $1.5\text{ mm} \leq 110 \leq$ の配向されたテルル化亜鉛 (ZnTe) 結晶により測定された代表的放射波形のグラフである。

図15は、本発明による2次元遠赤外画像適用の1つの実施形態の詳細図である。

図16は、本発明による2次元遠赤外画像適用の別の実施形態を示す。

図17は、図1に示されているなどの電気光学サンプリング装置に使用される電気光学結晶の別の実施形態を示す。

図18は、図17の石英ガラスとLiTaO₃内で反射している光学ビームの拡大透視図である。

図19は、図17の電気光学結晶に使用されているような石英ガラスプリズムの一実施形態の拡大図である。

図20は、石英ガラスハンドルに配置された図17の電気光学結晶を示しており、結晶の光軸の方向を示している。

図21は、電気光学信号強度に対するタイムディレイプロットからなる過渡波形を示しており、図17の結晶を採用している。

図22は、 $20\text{ }\mu\text{m}$ ZnTeセンサーにより測定されたテラヘルツ放射の時間的波形を示しており、最短共振時間は31フェトム秒である。

図23は、図22の波形の周波数スペクトルを示しており、5テラヘルツ～10テラヘルツの吸収は、放出体 (GaAs) とセンサー (ZnTe) による。

図24は、高繰返し率再生増幅レーザーを使用している、本発明による自由空間電気光学サンプリングの一実施形態の図である。

図25は、図24の1/4波長光学バイアスで平衡化された検出器により測定されたテラヘルツ放射の時間的波形からなる。

図26は、図25の時間的波形に対応する周波数スペクトル(FFT)及びノイズのグラフである。

図27は、本発明によるテラヘルツ画像の一実施形態の図であり、遠赤外(テラヘルツ)電場の2次元分布が、光学的画像へ変換されて、ZnTe結晶内でゲートされ、CCDカメラにより測定される。

図28は、図27のCCDの1つの画素により測定された図28aの時間的波形の周波数スペクトルのグラフである。

図29は、バイアスされた中心電極と接地された2つの側部電極を有するクアドロポール放出体の一実施形態を示す。

図29aは、図29のクアドロポールからのテラヘルツ電場のフォーカルプレーン画像の2次元グラフと三次元グラフからなる。

図30と30aは、フォーカルプレーン内のテラヘルツビーム路を横断して掃引するロッドのないフォーカルプレーン画像を示す。

図31と31aは、図27の画像装置を使用しているフォーカルプレーンにおけるテラヘルツビーム路を通して掃引されたロッドの2次元と三次元の画像を示す。

図32は、本発明の別の態様による超高速自由空間磁気光学サンプリング装置の一実施形態の図である。

図33は、センサーとしてトリビウム-ガリウムガーネットによる磁気光学信号(単一走査)の時間的波形のグラフである。

図34は、アモルファスガラス(SF-59)センサーによる磁気光学信号の時間的波形のグラフである。

発明を実施するための最良の形態

テラヘルツ画像は、電磁スペクトルのミリ波以下の領域において動作する斬新な技術である。高速光電子光学とフェムト秒レーザー技術の最近の進歩は、テラヘルツ放射の短いバーストの発生と検出を活用しており、これは、ミリ波以下の

範囲における分光測定に非常に有用であることが明らかにされた。テラヘルツ画像は、これらの分光測定をリアルタイム画像、及び進歩した信号の処理と反復を組み合わせており、従って、画像の各画素は、対象物に付いての分光情報を含んでいる。多くの場合、分光情報は、調査対象物の化学的組成に関する有力な手がかりを提供する。

テラヘルツ放射は、エム・ナス (M. Nuss) 著による論説“化学はT-光線画像に適している”、回路と装置、IEEE誌、1996年3月 (“Chemistry is Right for T-Ray Imaging,” Circuits & Devices, IEEE, March 1996) にかなり詳細に述べられている。

一般的に言えば、伝搬するテラヘルツビームの自由空間電気光学的な特徴づけの装置と方法がここに述べられている。これまでの技術と異なり、本発明による自由空間電気光学サンプリングは、振幅と位相の両方を含む、全テラヘルツ波形の有用な知識を提供することができる。ここに使用されているように、用語“自由空間”は、電気光学センサーが、マイクロ波または電場放出体から離れて配置されている。すなわち、“離れた電場”に配置されている。1メートル程離れた距離が実験的に確証されている。感知技術は、低周波電場（テラヘルツパルス）とテルル化亜鉛（ZnTe）結晶などの電気光学結晶内のレーザービーム（光学的パルス）との間の非線型接続に基づいている。偏光された電場を印加することにより結晶の複屈折を変調することは、結晶を通る光学プローブビームの楕円の偏光を変調する。次に、光学ビームの楕円変調は、偏光分析されて、印加された電場の振幅と位相の両方についての情報を提供する。

ZnTeプローブの予備データは、波長以下の空間的分解、フェトム秒の時間的分解（177-フェトム秒パルスの持続時間）、及び5テラヘルツの帯域幅が得られることを示している。恐らく最も明確には、検出の幾何学的配置の簡素化、光学的並列処理の能力、そして達成可能な優れた信号ノイズ比（ $\geq 100,000$ ）は、本発明による装置／方法を、リアルタイム2次元サブピコ秒遠赤外画像用途に適したものにしている。

図面に関し、同一参照番号が、同一または類似の構成要素を示すために、多く

の図面について使用されており、本発明による自由空間電気光学サンプリングの一実施形態が図1に示されている。この検出の幾何学的配置は、逆方向伝搬法からなっ

ており、光学プローブ信号は、結晶を通過する電磁場の方向と逆方向に、電気光学結晶へ入射する。信号が結晶を通過する電磁エネルギーと同じ方向の速度成分を有するように、結晶が光学的パルス信号を屈折するように構成されている。

操作上、電磁場の感知は、次のように作動する。電磁場信号は、電気光学結晶内で低周波偏光での変化を起こす電気光学結晶へ送られる。この低周波偏光での変化は、結晶内の屈折率の変化を発生する。屈折率の変化は、電気光学結晶に照射される光学プローブ信号により感知される。偏光アナライザーは、光学プローブ信号の光の偏光の変化を光の強度変化へ変換する。最後に、この光の強度変化が分析される。この変化は、電磁場信号に比例し、そして電磁場信号の特徴であることは、当業者には周知である。この信号分析は、“局所電場”コンテキストにおいて現在行われているものと似ている。

図1において、パルスの電磁放射 (THz パルス) 12が、電気光学結晶 14を照明すると、その屈折率はポッケルス効果により変調される。フェトム秒光学的パルス 16が、結晶を通過することにより、電場により発生した屈折率の変化をプローブする。電場により発生した楕円変調を強度変調へ変換するため、プローブパルスは、補償板 (C) と偏光子 (P) により分析され、次に、光検出器により検出される。検出効率を改善するため、テラヘルツビームが高感度シリコンレンズ 20により焦点が合わされ、これにより、センサーの結晶の過渡バイアスを大きく増加する。さらに、光学的チョッパーが使用されて、レーザーポンピングビームを変調し、ロックイン増幅器がノイズ低減のために使用される。これらは必須のものでなく、その使用は実施法に依存する。例えば、平行な光学プローブ入力により画像するならば、光学的チョッパーとロックイン増幅器は使用されない。

一般に10で示されているサンプリング装置は、本発明による概念を検討するのに有用な構成からなる。詳細な実施例として、ポンピングされた c w A r +レ

ーザー、モード固定Ti、すなわちサファイアレーザー22（コヒーレントMIRA）は、

150フェトム秒光学的パルスを、820nmで、76Mヘルツの繰返し率で送る。レーザー信号は、24において分割され、プローブパルス16とトリガーを適切なディレイステージ28を経て放出体26へ送る。フェトム秒レーザーパルスにより再び誘発された放出体26は、テラヘルツパルス12を放射するGaAs光導電放出体を有する。平板状の放出体は、2mmの光導電間隙を電極の間に有する。バイアス電場は、1.5KV/cmで、放出体への平均光学的出力は、400mWである。ディレイステージ28は、本発明により得られた位相と振幅の情報を制御する波形の形成を行う。それ自身の応答機能ではあるが、コヒーレントの測定を行う従来のアンテナと異なり、ここでは、“直接”または“絶対”測定からなるコヒーレントの測定が述べられている。本発明は、電場強度の決定のために振幅と位相の両方の直接測定を可能にする斬新な技術からなっていると確信される。さらに、電場振動の較正とマッピングが行われる。

テラヘルツ（THz）パルス12などのパルス電磁放射が、電気光学結晶14に放射されると、結晶の屈折率がポッケルス効果により変調される。電気光学結晶は、“局所電場”感知技術として知られている方法で、電場センサーとして使用される結晶に対し、正確に配向されなければならない光軸を有する。検出効率を改善するため、放射ビーム12は、シリコンレンズなどのレンズ20により好適に焦点が結晶へ合わされる。逆方向伝搬するフェトム秒の光学的パルスは、電場により発生した結晶の屈折率変化を、例えば、10μmのフォーカススポットなどでの結晶内の反射により探る。一実施形態として、500μm厚さのLiTaO₃結晶が、入射する放射の電場偏光に平行なC軸を有するポッケルスセルとして採用されている。この感知配列は、所望の位相整合状態を満足し、LiTaO₃内のこの状態は、図2によく示されているように、テラヘルツパルス12と光学的パルス16の間に71度の角度を必要とする（注．“逆方向伝搬”センサー10の他の結晶構成は図17～21に示されており、後に検討する）。

引き続いて図1に関し、電場により発生された楕円変調を強度変調へ変換するため、プローブパルス16は、光検出器18により検出される前に、補償板(C)と偏光子(P)を通る。プローブパルス16は、印加された電場、すなわち、テラヘルツパルス12の振幅と位相の両方の情報を提供する。脇道にそれた特定の実施例ではあるが、補償板(C)は、ベレク補償板、部品番号5540、販売元サンベイル、カリフォルニアのニューフォーカス社(Berek compensator, Part No. 5540, New Focus Inc. of Sunnyvale, California)から成り、一方、偏光子(P)は、グレン・レーザーポラライザー、部品番号GLD-M10-850、販売元ロングモント、コロラドのメドーラーク・オブティックス社(Glen Laser Polarizer, Part No. GLD-M10-850, Meadowlark Optics of Longmont, Colorado)からなっている。さらに、光検出器18は、シリコンフォトダイオード、例えば部品番号S2386-18K、販売元ハママツ社、ブリッジウォーター、ニュージャージー(Part No. S2386-18K, Hamamatsu Corp. of Bridgewater, New Jersey)からなっている。

さらに脇道にそれた説明であるが、1/4波長板(補償板(C))が、光学バイアスをプローブパルスへ加えるために使用されており、これは、装置が線形的に作動するのを可能にする。ウォラストン偏光子(WP)が、プローブビームの発生した位相遅延を、2つの相互に直交した線形偏光ビームの強度変調へ変換するために使用されるのが好ましい。2つの非バイアスのハママツ社特別注文の平衡フォトダイオード部品番号S1446に似ているフォトダイオード(部品番号S5533、販売元ハママツ社、ブリッジウォーター、ニュージャージー)が、平衡モードで接続されている。これらのフォトダイオードは、光学的強度変調を検出するために使用される。電気光学センサーが複屈折ならば、補償板が使用されなければならないことを付記しておく。しかし、GaAs及びZnTeのようなすべての亜鉛混合結晶の結晶センサーが、複屈折でないならば、1/4波長板が、補償板の代わりに使用される。必要ならば、ファイバー光学的リンクが、電気光学センサーの出力を検出機

構へ接続するために使用することができる。これは、ここに呈示されたサンプリ

ング法のすべてに対して選択できる。

再び説明すると、テラヘルツビームが、結晶軸に平行な偏光を有する、電気光学LiTaO₃結晶に放射されると、屈折率は、ポッケルス効果により変調される。結晶のC軸にその偏光45度のフェトム秒光学的パルスは、電場により誘発された屈折率の変化を探る。

図3は、良い速度整合状態を得るために注意深く配列されたプローブビーム路を有する非バイアスGaAs放出体からの過渡波形をプロットしている。良好な速度整合状態により、優れた信号ノイズ比が得られている。主ピークの半波高全幅値(FWHM)は、450フェトム秒である。電気光学センサーの電場測定は、純粋に、電気光学法であり、位相が整合されており、そして、システムの帯域幅は、テラヘルツ信号の分散と結晶内のレーザーパルスの持続時間により制限される。得られる広い帯域幅、最小電場摂動、及び自由空間電気光学システムの実際の時間的相互相関は、本発明にかかる実施例に特有の特徴である。本来のテラヘルツ波形を自由空間電気光学サンプリングにより得られた相互相関信号から抽出すること可能である。この方法は、センサー結晶との電氣的接触の必要を排除している。その上、電気光学結晶板とCCDカメラによるリアルタイムテラヘルツ画像は、ここに示された概念により、科学的、商業的に実現可能である。

図1～3の実施例において、テラヘルツビーム伝搬方向に投射された、結晶から反射された逆方向に伝搬している光学ビームの速度は、移動するテラヘルツの電場の速度と一致する。結晶内における光学プローブビームとテラヘルツビームとの相互作用距離は、約200μmである。ほぼ速度整合した状態は、ウォークオフ効果を低減し、時間応答性を高め、良好な信号ノイズ比を生成する。しかし、テラヘルツビームと光学ビームは、逆方向へ伝搬するので、光学ビームの配列が単一ビームの代わりに使用されるならば、画像用途の場合、この構成は、最適条件以下になる。

これを克服するため、図4は、光学ビームとテラヘルツビームが、電気光学結晶内において共線的に伝搬する別の実施形態を示している。一般に30で示されたこの感知装置は、前述の逆方向伝搬法の特有の変形例である。示されたこの実

施形態において、電気光学結晶 32 は、テルル化亜鉛 (ZnTe) からなっており、そして、これは、固有の複屈折に関連した限界及び熱的変動に対する低下した感度を除いて、LiTaO₃ 良度指数と比較される電気光学良度指数 ($n^3 r / \epsilon$) を有する。

有利なことに、この共線的伝搬の実施形態は、光学プローブビームと電磁場信号との間の長い相互作用を、結晶内で行い、これは、示された自由空間幾何学的配置において、優れた信号ノイズ比を備えている。この比は、従来の電気光学サンプリング幾何学的配置より得られるすべてのものより遥かに大きい。図4は、レーザー22が、24において分割されて、ディレイステージ28を通った後、プローブパルス16とトリガー信号を放出体へ送る光学的パルスを発生する点で、図1の構成と似ている。しかし、この幾何学的配置は、ビームスプリッター31、例えば、1インチの薄膜ビームスプリッターが、電磁場12が伝搬している方向に光学プローブビームを整列するように使用されている点で図1と異なる。例えば、焦点が合わせられていないテラヘルツビーム12と、電気光学結晶32の事前に焦点合わせられた光学プローブビーム16の直径は、それぞれ、約10mmと0.2mmである。この構成は、後に述べるように、テラヘルツ画像装置に使用されているものと似ており、プローブビームのスポット（画素の大きさ）はテラヘルツ波長に相当する。

1.5mm厚さの $\leq 110 \geq$ 配向されたZnTe結晶は、電気光学的感知ヘッドとして使用されている。この配向は、亜鉛混合結晶構造体に最大の電気光学遅延を発生し、本来隔離された $\leq 110 \geq$ 面への光学的入射も、ZnTeで最良のビームを生成する。光学プローブとテラヘルツビームの両方の偏光は、最適電気光学位相変調のために、ZnTe結晶の $\leq 110 \geq$ エッジに平行でなければならないと言われている。このプローブビームは、前述のように、補償板により一定遅延 ($=BC/$

2) に光学的にバイアスされ、ウォラストン偏光子により分析され、平衡光検出器により測定される。測定中における光学的ポンピング／プローブビームの出力比は、約10,000:1である。

幾つかの電気光学的にゲートされたパルスのマイクロ波放出体が試験された。放出体は、センチメートル程度の大きさの電気光学的タップドアンテナ（過渡電流源）、ブルースター入射角の非バイアス $\leq 100^\circ$ GaAs ウェーハ（過渡電気光学的源）、及び直角入射 $\leq 111^\circ$ 亜鉛混合ウェーハ（光整流源）からなっている。これらの放出体は、マイクロ波パルスを約150フェトム秒～65ピコ秒のパルス持続時間で発生する。最短マイクロ波パルスは、テラヘルツ光整流源（ $\leq 111^\circ$ 亜鉛混合結晶）から発生し、最長パルスは、大きな末端の光導電タップドアンテナから発生する。付記しておくことは、従来の電気光学サンプリングの時間的分解が、レーザーパルスの持続時間または光学的音響共振により制約されることである。71フェトム秒ほど短い分解は、実験的に確立され、これは明らかに、電気光学的サンプリングの記録である。

第1組のテストされた放出体は、光導電の一對の回線、中心フィードのアンテナであった。このアンテナは2つの銅製導体を有し、導体のそれぞれはアルパイソントタイプのホーンに似ている。間隙が約1mmのGaAs光導電体は、一様な伝導回線部へ電気的に接触されていた。これらの放出体の開放された端部の長さは、センチメートル程度であり、これは数百ギガヘルツの低周波共振に相当する。150Vの静的バイアスが、光導電スイッチに加えられた。一般に、放出体への光学的トリガーの平均出力は、50mWであった。センサー位置におけるパルスマイクロ放射と光学プローブビームの測定されたビームの半径（電場への $1/e$ ポイント）は、それぞれ、約4cmと0.02cmである。これは、センサーにおけるマイクロ波ビームと光学プローブビームとの予期された断面比40,000:1を得る。

図5は、光導電アンテナの1つからの時間的電気光学信号のグラフをプロットし

ている。1ナノ秒以下の信号レーザー及び最初の450ピコ秒だけが示されている。限界は、7.5cmの移動距離を有するタイムディレイステージから発生し、測定を500ピコ秒または対応する2ギガヘルツへ制限する。長いディレイステージまたは電子的走査により、低周波の限界が、レーザー反復周波数の近くに

低下され、これはここで検討される装置の一実施形態において82メガヘルツである。主振動以前の小さな特徴が、表示走査に再生される。信号ノイズ比は、マイクロ波と光学ビームの断面比が40,000:1であっても、100,000:1より良い。

図6は、20ギガヘルツにおける中心周波数と、6.3ギガヘルツの3dB帯域幅の周波数スペクトルを示している。大きいアンテナホーンからの増加した低周波成分は、他のアンテナの測定により確認された。

再度説明すると、自由伝搬するパルス電磁放射の特徴づけに付いての、共伝搬する電気光学テルル化亜鉛結晶の広域検出能力がここに示されている。現在の電気光学サンプリング装置においては、測定された高周波応答は、テルル化亜鉛センサー結晶の最初のTO音響共振(5.3テラヘルツ)であり、低周波の限界は、レーザー繰返し率(82メガヘルツ)である。センサー周波数応答の上限は、結晶の光学的音響が音響周波数における電磁放射を強く吸収するので、最初の側方光学的音響周波数である。異なる電気光学結晶により高い周波数応答を得ることは可能である。例えば、InPとGaAsのTO音響周波数は、それぞれ、9.12テラと8.06テラヘルツであるので、InPは、修正された放出体として、GaAsは、ポッケルス結晶として使用される。レーザー繰返し率より低い測定能力に近づくために、電子的に制御されたタイムディレイ走査のcwレーザーダイオードが、むしろ、ここで説明した機械的遅延回線を有するフェムト秒レーザーよりも使用される。

異なる音響周波数を有する幾つかの電気光学結晶が、試験された。結果は、GaPは、高い周波数の使用に良い候補であることを示している。図7は、 $1 \leq \text{GaP}$ センサー結晶により測定された時間的波形のグラフである。レーザーは45

フェムト秒のパルス持続時間を有し、現在、その帯域幅はGaAs放出体により制限されている(8テラヘルツにおける音響)。図8は周波数スペクトルであり、8テラヘルツに近いカットオフ周波数を示している。水蒸気と他の気体の吸収線ははっきりしている。GaPは、GaPを放出体とセンサーの両方に使用する

ことにより、11テラヘルツで、その最初の音響周波数を有するので、10テラヘルツより大きい帯域幅が期待される。時間分解された10%~90%の過渡状態は、50フェトム秒である。これは、コヒーレントを測定する最も短い電氣的過渡状態である。

パルス電磁波放射のための自由空間電気光学場センサーのダイナミックレンジも、研究されてきている。線形の6ディケードでスパンする光学プローブ出力と優れた信号ノイズ比により、遠赤外2次元画像を光学的2次元画像へ変換することに適している。図9は、電気光学信号（ピーク〜ピーク）に対する0.66mW~700mWの光学的ポンピング出力のプロットである。光学プローブの出力は、2mWであった。自由空間電気光学サンプリングシステムは、線形範囲で作動されるので（ $\pi/2$ で光学的にバイアスされた）、放射された電場は低出力における光学的強度に比例しており、そして、測定された電気光学信号は、テラヘルツ電場光学的ポンピング出力に比例する。図9の直線部の傾斜は、約200nA/Wである。図10は、電気光学信号（ピーク〜ピーク）に対する8nW~9.83mWの光学プローブ出力（平均）のグラフである。非バイアスのGaAs放出体への光学的ポンピング出力は、500mWであった。42 μ A/Wの傾斜の電気光学信号の直線性は、プローブ出力の6桁にわたって観察される。8nWプローブ出力で測定された波形の形状は、9.8mWにおいて測定されたものと同じである。プローブ出力として残された数千の信号ノイズ比は、50 μ Wより低い光学プローブ出力を除いて、変化していた。

中位の強度における光学的ポンピングとプローブ出力の両方の直線性が、期待される。増幅されたレーザー装置は、また、テラヘルツビームを発生し、検出する光

学的源として使用された。光学的源は、再生的Ti、すなわちサファイアレーザー増幅器（Coherent Rega-9000）である。パルス持続時間は約200フェトム秒、その繰返し率は250KHzである。平均の光学的励起出力は0.75Wで、これは3 μ Jのパルスエネルギーに相当する。一般に、放出体へ入射する平均の光学的ポンピング出力は、250mWで、光学プローブ出力は約100 μ

Wである。検出器は、低光学的出力装置に使用されたものと似ている。図11は、ZnTeセンサー（1.44mmの厚さ）により測定された一般的な波形のグラフである。信号ノイズ比は10,000より大きい。主信号ピーク（25ピコ秒時間位置で）の前の小さいピークは、センサー内の反射された光学プローブビームとテラヘルツビームのサンプリング効果による。比較として、光学プローブビームと反射されたテラヘルツビームのサンプリングは、主信号ピークの後に始まる。1/4波長光学バイアス点での最大光変調深さは、8%より大きく、コントラスト比は、ゼロ波の光学バイアス点において80%より良い。センサーに焦点が合わせられた、予期された放射電場は、3.4mmのGaAs光導電放出体にかかる900Vの一定電圧により、1.8KV/cmである。テラヘルツビームの焦点は、約1mmである。一般的測定において、信号ノイズ比は、100,000より良い。16ビットダイナミックレンジを有するロックイン増幅器を使用するため、非常に低い光学プローブ出力が、ロックインにおける過負荷問題を防止するために使用される。1つの測定として、約1~50μWのプローブ出力が使用された。図12は、ポンピングビームの信号/ピーク出力のグラフであり、これはキャリア・スクリーニング効果による。

図13は、本発明による、一般に50で示された共伝搬電気光学サンプリング装置の別の実施形態を示す。この単純化されたセンサー構成において、フェトム秒光学源は、アルゴンイオンレーザーによりポンピングされたTi、すなわちサファイアレーザーからなっているとする。テラヘルツ電場は、ブルースター角において入射した非バイアスGaAsウェーハから形成される。1インチの薄膜ビームスプリ

ッター52は、左から右へ伝搬するテラヘルツパルス51に対し透明であり、同期した光学プローブビーム53をテラヘルツパルスに沿って共線形状に配向する。レンズ(L) ($f=1\text{ m}$) がプローブビーム路に配置されているが、レンズはポンピングまたはテラヘルツパルスには使用されない。電気光学結晶54の非焦点合わせのテラヘルツパルスと事前焦点合わせの光学プローブビームの直径は、それぞれ、10mmと0.2mmである。プローブビーム光点(0.2mm)は、

テラヘルツ波長に相当する。すなわち、1テラヘルツの波長は、空気中において約0.3 mmである。

1/4波長板($\lambda/4$)56が、システムが線形的に作動できることを可能にするプローブビームへ、光学バイアスを加える。ウォラストン偏光子(WP)58が、プローブビームの誘起された位相遅延を2つの相互に直交した線形偏光ビームの強度変調へ変換するために使用されている。非バイアスモード(例えば、ハマツ社特別注文平衡フォトダイオードタイプS1446)において接続された2つのフォトダイオード(例えば、モデル番号S5533、販売元ハマツ社、ブリッジウォーター、ニュージャージ)が、光学的強度変調を検出するために使用されている。検出器の暗電流は、非バイアス状態で0.1 pAより小さい。

幾つかの材料がテストされた。これらの材料には、ZnTe, CdTe, ZnTe, GaAs, CdZnTe, LiTaO₃, LiNbO₃, BGO, GaP, BaTaO₃, 及び有機DASTなどの結晶である。複屈折結晶(LiTaO₃, LiNbO₃, 及びDAST)は、2つの屈折率の異なる、温度依存による大きい偏光変動を有する。この偏光変動は、ウォラストン偏光子の後に強度ノイズに変換される。テスト結果は、ZnTeが、本発明に関して、最良の感度、帯域幅及び安定性の特徴を有することを示した。

図14は、厚さ1.5 mmの $\leq 110 \geq$ 配向ZnTe結晶により測定された代表的放射波形を示す。GaAs放出体への入射された、平均の光学的ポンピング出力は、2 mWの光学プローブ出力で535 mWであった。0.3秒の時定数のロックイン増

幅器(例えば、タイプSRS850)を使用して、波形は、信号ノイズ比(SNR) ≥ 3000 を有する。光検出器が、ロックイン増幅器と平均化とを使用せずに、オシロスコープへ直接に接続されるならば、ディジタルオシロスコープに表示されたSNR ≥ 50 と10ピコ秒の時間的ウィンドウ(タイムディレイ)による、秒当たり40波形におけるリアルタイム測定を行うことができる。

テラヘルツ電場測定に電気光学センサーを使用するには、現存の文献に述べられた光導電アンテナよりも遥かに小さい光学プローブ出力を必要とする。この理

由は、PIN (nタイプ半導体上に固有の半導体上にpタイプ半導体) フォトダイオードが自由空間電気光学サンプリングに使用することができるからである。一般に、フォトダイオードの光感度は、従来の超高速光導電アンテナより遥かに高い。制限されたキャリアの移動性、接続効率、及び薄い光学的吸収層は、一緒に作動して、超高速光導電アンテナの応答性を制約する。

重ねて言うと、検出構成の単純化、光学的並列処理の能力、及び優れた信号ノイズ比は、本発明を、リアルタイム、2次元コヒーレント遠赤外画像用途に魅力あるものにする。例えば、システムは、電気光学結晶板とフォトダイオードの列またはCCDカメラにより、空間的、時間的電場分布（遠赤外画像）を光学的画像へ変換するように構成されている。

一般に100で示されているこの様な装置の一実施形態が、図15に示されている。このシステムは、コンピュータモニター102に、葉からなるサンプルの対象物により伝達された2次元電場分布を表示する。サンプル対象物から送られた信号の周波数範囲は、テラヘルツからギガヘルツである。サンプル対象物を通過した後、電場ビームは比較的大きい電気光学結晶106へ入射し、これにより、前述のように、結晶の屈折率を変える。1つの適切な結晶106は、 $\leq 110 \cong \text{ZnTe}$ 結晶である。

光学ビーム110は、図1と4に関連して説明したように処理するために、偏

光子112と補償板114を通るレーザービームからなる。光学プローブビームは、電場の分布が大きい電気光学結晶106を通過するとき、電場分布と共線形状であるように反射される。再度説明すると、共線形を形成することにより、長く放射された電場での光学ビームの相互作用の長さは、幾何学的配置が人間の組織などの対象物を画像するために使用することができるように得られる。

逆方向伝搬の幾何学的配置による検出の一般的概念は、時間分解された遠赤外分光に広く使用されていることを付記して置く。しかし、テラヘルツビームと光学ビームは、逆方向から入射するので、画像用途の場合のように、光学ビームの配列が単一ビームの代わりに使用されるならば、その輪郭は実際には役に立たな

い。再び、この制約を克服するため、光学プローブとテラヘルツビームが共線的に電気光学結晶を通り伝搬する画像の用途がここに説明されている。光学プローブビームは、結晶内における電場の空間的、時間的分布を探る。100 mWの平均プローブ出力は、 $SNR \geq 200$ により画素当たり50 pAの信号電流（42 μ A/Wの傾斜で、80%の光充填係数により1.5 μ W/画素として）において、 256×256 画像を生成する。光学プローブビームの偏光回転を点検する偏光子116を通った後、信号は、CCDカメラ118により平行に集光され、信号処理のため、すなわち、データ分析（例えば、データの平均化）、周波数分析、カラーコーディング及び情報表示のために、デジタルでコンピュータ102へ送られる。空間分解がテラヘルツの波長（300 μ m）により制限されるならば、この画像は7.6 \times 7.6の大きさを有する。送られた電磁放射（テラヘルツパルス）がウェーハにゆるく焦点が合わされているならば、3インチのGaAsウェーハが電気光学センサーとして適している。センサー結晶は、比較的大きく、多くの単一画素波形を瞬間的に受信する検出器の配列があるので、2次元または空間的画像が可能である。

図16は、連続電磁波がgunnダイオード122により形成され、レーザーダイオード124が光学プローブビームを発生することを除けば、図15の画像シス

テムと似ている。この構成において、gunn発振器は、テスト中のサンプルを感知する固有の周波数に調整される。サンプルを通る放射は、電気光学結晶を通る放射と共線形に、再び配置された光学プローブビームがセンサー内の電場強度を測定する範囲内で電気光学センサー100へ入射する。放射電場強度情報をセンサーから送る光学プローブビームは、CCDまたはダイオードの列118により検出される。

簡単に前述したように、別の結晶の幾何学的配置が図17に示されており、図1などの感知装置に使用される。この構成において、光学プローブ信号は、結晶を通る電磁場の方向と逆方向に、電気光学結晶へ入射する。一般に200で示されているこの結晶は、2つの石英ガラスプリズム204の間に挟まれた薄いリチ

ウム・タンタル酸塩板202からなっている。図18は、結晶200を通る光学プローブ信号16の部分拡大図であり、図19は、電気光学結晶アッセンブリ200に使用されたシリカプリズム204の一実施形態を拡大図で示している。一具体的実施形態として、薄いリチウム・タンタル酸塩板202は、厚さが100ミクロンであり、プリズム部分204の大きさは、 $X=2\text{ mm}$ 、 $Y=3\text{ mm}$ 、 $W_1=0.1\text{ mm}$ 、 $W_2=1.17\text{ mm}$ から形成されている。速度の整合を得るために、光学プローブビームとテラヘルツビームは、 70.8° の角度で交差しなければならない。リチウム・タンタル酸塩に関しては、 $n(800\text{ nm})=2.16$ 、 $\epsilon=43$ 、テラヘルツ波と光学波との間の速度整合は、それらの間の角度が次式であることが必要である。

$$\theta_m = \cos^{-1}\left(\frac{n}{\sqrt{\epsilon}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{2.16}{\sqrt{43}}\right) = 70.8^\circ \quad (1)$$

石英ガラスとリチウム・タンタル酸塩が接する境界面の入射角は、

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{n}{n_f} \sin 19.2\right) = \sin^{-1}\left(\frac{2.16}{1.45} \sin 19.2\right) = 29.3^\circ \quad (2)$$

であり、石英ガラスプリズムの角 θ_p は、次式により決定される。

$$\theta_p + \theta = \pi - \theta_p + \frac{\pi}{2} \Rightarrow \theta_p = \frac{270 - \theta}{2} = 120.4^\circ \quad (3)$$

石英ガラスの臨界角は 43.6° であり、従って、光学プローブビームは、プリズムアッセンブリ200内において全反射モードで誘導される。石英ガラスとリチウム・タンタル酸塩の境界面における反射は、ほぼ6%である。

導波効果とテラヘルツ型のリチウム・タンタル酸塩の分散とにより、歪のない検出が、3テラヘルツまで可能である。この利点は、リチウム・タンタル酸塩がGaAsより高い電気光学係数 $10\times$ を有し、光学ビームとの相互作用の後、テラヘルツの分散が光学ビームより3倍短い移動距離に制限されるので、結晶内を伝搬するテラヘルツビームは、もはや、電気光学信号に寄与せず、テラヘルツビームの移動距離の短い効果は、シリコンレンズの緻密な焦点合わせに関連して有利であり、結晶の大きさに依存して、反射のないタイムウインドウが800ピコ

秒より長く、これはほかのサンプリングの幾何学的配置を用いても整合されず、光学ビームはテラヘルツビームを横切って走査するので、シリコンレンズの焦点合わせにより生成された周波数依存のテラヘルツのスポットの大きさは、平均化され、良い周波数応答を与えることである。

図20は、図17に示されているような結晶アッセンブリを使用している、電気光学信号強度に対するタイムディレイのプロットからなる過渡波形のグラフである。最後に、結晶アッセンブリ200の増強された実施形態が図21に示されており、

ここでは、結晶の基盤に取り付けられた石英ガラスハンドル210が、その操作を容易にするため設けられている。結晶のc軸の方向は、矢印205により示されている。具体的サンプルとして、ハンドル210の大きさは、 $x' = 3.4 \text{ mm}$ 、 $y' = 1.0 \text{ mm}$ 、及び $T = 0.5 \text{ mm}$ からなっている。

テラヘルツビームの特徴に関する自由空間電気光学（EO）センサーの主要な利点の1つは、使用可能な極端に広い周波数帯域幅である。一実施形態において、出願者は、37テラヘルツ以下の中間遠赤外テラヘルツビームのコヒーレントの検出を考案した。これは重要な改善を示している。

大抵のEOセンサーに関し、音響吸収は10テラヘルツより小さい上限を課する。しかし、残留線帯域を超えて、大抵の半導体EOの材料は、近赤外線までずっと透明である。これは、中間赤外線領域における自由空間EOサンプリングの可能性を大きくする。ボンバレット他（Bonvalet et al.）は、15フェトム秒レーザーによる光整流によって中間赤外線テラヘルツビームが発生することを示した。参照は、“アプライド フィジックス レター” 67巻2907頁（1995年）（“Applied Physics Letter,” volume 67, pp2907, 1995）。これは、参考として、ここにそのまま取り入れられている。このテラヘルツ源と組み合わせられて、EOセンサーが多様なコヒーレント分光に使用される。

EOセンサーの周波数応答は、主に、光学群の速度の不整合と周波数依存のテラヘルツ位相の速度とにより決定される。ZnTeセンサーの最適な厚さは、中間赤外線検出について約 $20 \mu\text{m}$ である。

実験装置は、約500 mWの平均出力で12フェトム秒レーザーパルスを発生する固定モードのTi、すなわち、サファイアレーザーからなる。レーザー出力350 mWは、有効焦点距離5 cmの軸外し放物面鏡により、 $\langle 110 \rangle$ 配向GaAs放出体に焦点が合わされた。広い帯域のテラヘルツ放射が集光され、一組の $f/0.6$ の放物面鏡によりEOセンサーに焦点が合わされた。レーザープローブビームが、

厚さ2 μ mの薄膜と共線形に移動するように組み合わせられ、それは、レーザーパルスの幅とテラヘルツビームへの影響をほとんど無視できるものである。超高速ポッケルス効果により誘起されたEO変調は、一組の平衡フォトダイオードにより検出された。 $2 \times 10^{-8} \text{ Hz}^{-1/2}$ 程度に小さい光変調($\Delta I/I$)の検出感度が、定常的に得られた。ポンピングとプローブパルスの間の遅延を変化することにより、中間赤外線過渡の時間変域の波形が詳しく記されている。

図22は、300ミリ秒のロックイン時定数で単一走査において得られた代表的波形を示す。厚さ0.45 mmの $\langle 111 \rangle$ GaAsが、放出体として使用され、厚さ20 μ mの $\langle 110 \rangle$ ZnTeがEOセンサーとして使用された。テラヘルツパルスは、低周波数成分より速く移動する高周波数成分により、はっきりとかん高い音を発生する。GaAsの前面に発生したテラヘルツパルスがその材料の残りを伝搬するときに、この音の発生が起こる。振動の最短時間は31フェトム秒である。波形のフーリエ変換が図23に示されており、最高の周波数応答は、37.3テラヘルツに達する。5テラヘルツ～10テラヘルツの間の間隙は、ZnTeとGaAsの残留線末端によるもので、17テラヘルツ付近の周波数の低下は、分析中である。予備的結果は、超高速遠赤外測定 of 線形電気光学効果(ポッケルス効果)を中間赤外線のパルス電磁放射へ使用することの利点を示している。

自由空間テラヘルツ(THz)ビームの電気光学システムにおける μ Jパルスエネルギーによる、高速繰返し率(250キロヘルツ)の再生増幅されたレーザーは、信号ノイズ比($> 10^5$)と絶対単ビーム光変調深さ($> 8\%$)の両方の著しい改善を行った。ダイポールとクアドロポールの一様な光導電放出体内の電

場分布のフォーカルプレーン画像（強度と極性）を次に示す。移動対象物のリアルタイム2次元テラH z 画像の予備的結果が得られた。

LiTaO₃結晶内の位相遅延による高出力テラH z 検出の1キロヘルツの繰返し率におけるかん高い音のパルス再生増幅器（Clark MXR）の使用が示された。しか

し、信号ノイズ比（SNR）は、低い繰返し率、センサー結晶、及び偏光子配列の幾何学的配置により制限された。本発明者は、ZnTeセンサー結晶による、自由空間電気光学サンプリング（FS-EOS）システムにおける自由空間テラH z 放射の発生と検出についての高繰返し率再生増幅されたレーザーの使用を報告する。普通の低いピーク出力のレーザー発振器または低い繰返し率の再生増幅器の代わりに、高いパルス繰返し率の μ Jパルスレーザーエネルギーを使用することは、特に、移動対象物のリアルタイムテラH z 画像用途において、前述のFS-EOSシステム全体にわたるかなりの改善を行う。ダイポールとクアドロポールのテラH z 光導電放出体の遠赤外放射画像が、この能力の証拠として示されている。

改善された時間分解テラH z 画像システムの核心部は、増幅された光学源とFS-EOSとからなっている。前者は、250キロヘルツ繰返し率、3 μ Jパルスエネルギー、及び800nmで200フェトム秒パルス持続時間のTi、すなわちサファイア再生増幅システム（Coherent RegA 9000）である。図24は、平衡光検出器を使用しているサンプリングユニットを示す。このシステムは、前に報告したシステムに似ており、そのシステムは、非増幅源、すなわち、コヒーレントエムアイアールエー900（Coherent MIRA 900）及びスペクトラ・フィジックス・ツナミ（Spectra-Physics Tsunami）に基づいていた。厚さ2 μ mの薄膜ビームスプリッターは、テラヘルツビームに対し透明であり、同期された光学プローブビームの50%をテラH z ビームに沿って共線形に反射するために使用される。テラH z と光学プローブビームの偏光は、厚さ1.1mmの<110>配向ZnTeセンサー結晶の[1, -1, 0]の方向に平行に配列されている。センサーに続いて、1/4波長板が、 $\pi/4$ 光学バイアスをプロ

ブビームに与えるために使用され、これにより、システムは、線形範囲で作動することができる。ウォラストン偏光子が、プローブビームのテラH z 電場で誘起された位相遅延を、2つの相互に直角な線形偏光ビームの間の強度変調へ変換するために使用される。平衡モードで接続され

た一組のシリコンPINフォトダイオード (EG&G C30808E) が、光学的強度変調を検出するために使用される。デジタルロックイン増幅器 (SR S850) により測定された、平衡フォトダイオードからの代表的ノイズ電流は、数pA (300ミリ秒の時定数) であり、焦点が合わされたテラH z ビームからの信号電流は、数 μ Aを超える。30 μ Aより大きい最大信号電流に対応する10,000,000 (23ビット) に近いダイナミクスを測定するために、2 μ Aのフルスケール読み出し電流により、デジタルロックイン増幅器のダイナミックレンジが16ビットだけであるので、ロックイン増幅器に並列に接続された100K Ω 抵抗体が、入力インピーダンスを減少するために使用される。

2.7KV/cmのバイアス電場と、厚さ1.4mmの<110>ZnTeセンサーとを有する2mmのGaAsの光導電放出体を使用して、平衡フォトダイオードにより測定された、分析器の後のプローブビームの最大変調深さは、7.7%である。これらの値は、ZnTeセンサーにおける1.6kv/cmのピークテラH z 電場に相当する。図25は、平衡検出器により測定されたテラH z 放射の代表的時間的信号 (光電流) のグラフを描いている。GaAs光導電体への平均ポンピング出力は、垂直入射において240mWであり、平均プローブ出力 (ZnTe結晶の後の) は約36 μ Wである。焦点合わせされたテラH z ビームとZnTe結晶への光学プローブビームとの直径は、それぞれ、約1.5mmと0.6mmである。ピーク～ピークの信号電流は、1.6 μ AのそのRMSノイズに対して450 μ Aより小さい。システムの信号ノイズ比をより良く特徴づけるために、信号とノイズの周波数スペクトルが図26にプロットされている。0.1テラH z から1.2テラH z まで、SNR (テラH z 電場オン/オフ光電流の比として定義される) は、50,000～100,000の間である。厚い結晶、高い放出体バイアス電場、及びZnTeセンサー内のテラヘルツビームの緻密な焦

点は、SNRと絶対変調の深さの両方をさらに増加する。

優れたSNRとより一様な光学的検出により、テラHz結像を行うことができる。

図27は、テラHz画像設備を示す。遠赤外テラHz電場の2次元分布は、ZnTe結晶内でサンプリングされた光学的画像へ変換され、CCDカメラにより測定される。一般に、テラヘルツビーム源は、大きい開口のある平面のGaAs光導電体であり、2インチシリコンレンズまたは一組の2インチの軸外し放物面鏡が、テラHz放射を集光して、焦点を結ばせるために使用されている。画像実験に関して、普通のCCD画素の小さく十分に高い能力により、CCDは、背景の光により容易に飽和する。従って、前述の1/4波長板は、背景の光を減少するために取り除かれる。この配列（ゼロ光学バイアスに近い）からの焦点が合わされたテラHzビームによる最大関連の光変調の深さは、50%より良い。しかし、一般的な光変調深さを有する大きい断面のテラHzビームは、10%~30%で、そして、ZnTe結晶内の検出から散乱された光は、電気光学検出をほぼ線形に維持するに十分である。

図28は、テラHzの焦点の1つからの周波数スペクトルのグラフであり、図28aは、単一のCCD画素から記録された時間的テラHzの信号であり、データは、66.6フェトム秒の時間ステップで100個の連続フレームから取り出された。時間分解された画素（288×384画素）は、それらの連続フレームを記録することにより得られる。平衡検出と異なり、ロックイン増幅器はCCD配列と共に使用することが出来ない。

本発明者は、平面のクアドロポールテラHz放出体から電場分布の画像を描いた。図29は、中心電極がバイアスされ、2つの側部電極が接地されているクアドロポール放出体を示している。中心電極は幅が1mmであり、1cm以上の長さを有する。側部電極の間隙は、それぞれ、1.5mmと2mmである。このクアドロポールの幾何学的配置は、逆の極性を有する2つの非平衡なダイポールを生成する。ピーク電場分布は、図29aに2次元と3次元のグラフで描かれている。図29aは、放射パターンと2つの相対するダイポールの極性をはっきりと

示している。

この自由空間電気光学テラH z 画像法の最も重要な用途の1つは、移動しているか、

または生きている対象物を結像する能力である。フォーカルプレーンにある移動対象物の画像は、ビデオ速度（38フレーム／秒）で見ることができる。この能力を証明するため、ダイポール放出体（ $2 \times 5 \text{ mm}^2$ 光導電体）が、フォーカルプレーンから約1 cm離れて配置された。図30と30aは、画像路に対象物の無いオリジナルのテラH z 画像パターンを示しており、図31と31aは、対象物（直径2 mmの木製のロッド）が、フォーカルプレーンでテラH z ビーム路を通過して掃引されている時の画像を捕らえている。

このシステムは、また、破損するまでバイアス電場を変化するダイナミック放射プロセスを記録するためにも使用できる。5,000,000画素／秒の読み出し速度による、我々の現在のCCD（Princeton Instrument, PentaMax）の最大フレーム送り速度は、38フレーム／秒であり、4×4保管で152フレーム／秒まで保持することができる。数個のCCDからの最も速い送り速度は、2000フレーム／秒以上に達しており、急激な増加によるテラH z 放射パターンを含むリアルタイム2次元過渡プロセスを結像するのを可能にしている。

結論として、本発明者は、速い繰返し率と高いパルスエネルギーの両方を組み合わせた再生増幅レーザーにより、自由空間電気光学画像を証明した。この点で、画像システムのかなりの改善が得られた。移動対象物のリアルタイム画像を含むフォーカルプレーンでの2次元画像（ 1 cm^2 ）の成果が得られた。

別の面において、本発明は、さらに、自由空間超高速磁気光学サンプリング技術からなっている。特に、自由に伝搬する過渡的磁気パルスの特徴づける超高速磁気光学サンプリングシステムが以降に示されている。テラヘルツビームに関連した、時間分解された磁場の直接の実験的な測定値が示されている。

図32は、本発明による超高速磁気光学的サンプリングのための装置を示している。装備は、Ti、すなわちサファイアレーザー再生増幅器（Coherent RegA）を含み、 $4 \mu \text{ J}$ ／パルスをあたえることで、この増幅器は250 KHzにおい

て220

フェトム秒の持続時間と800nmの波長を発生する。ビームは、95/5ビームスプリッターによりタイムディレイポンプへ分割され、テラHz放射と弱いプローブビームを発生するのに、ポンプがバイアスされたGaAs放出体であり、これは過渡的磁場により生成された磁気光学センサー結晶内のファラデー回転を測定する。磁気光学サンプリングの幾何学的配置は、電気光学サンプリングの幾何学的配置と異なる。この実験において、テラHz放出体は、センサーから数センチメートル（1.5cm～5cm）離れ、プローブビームの伝搬方向に対し直角な位置に配置されている。この手法はファラデー効果に支配されるので、テラHz波形の磁気成分は、次式により複屈折率を生成するようにプローブ波形と共線形に伝搬しなければならない。

$$\theta \approx VBL \cos \gamma$$

Vはヴェルデ定数であり、Bは磁場の大きさ、Lは結晶の長さ、 γ は磁場の方向とプローブビームの方向との間の角（この場合、 $\gamma = 0$ ）である。プローブビームの検出システムは、電気光学サンプリング信号の検出システムに似ており、一組の平衡検出器とロックイン増幅器を含んでいる。磁気信号の時間波形は、コンピュータ駆動の変換ステージのタイムディレイを走査することにより記録される。

自由空間のサブミリメートル波の放射において、磁気成分のパルス幅は、電気成分と同様に短く、そして、平面波近似における電気成分の磁気成分への増幅率は、真空中の光の速度である。

数個の磁気光学センサーがテストされた。選択されたセンサーの1つは、ガビウム-ガリウム-ガーネット（TGG）であり、これは、高いヴェルデ定数（すなわ

ち、 $V = 61$ ラジアン/ $T \cdot m$ ）、小さい光学吸収率（ $\approx 0.0015/cm$ ）、高い熱伝導率（ $K \approx 7.4 W/K \cdot m$ ）を有する。小さい光学的吸収率と高い熱伝導率は、結晶内の等質なファラデー回転を生成する。図33は、センサーとしてのTGGによる磁気光学信号の時間的波形（単一走査）のグラフを示している。現在

の幾何学的配置は、図33の33ピコ秒の測定された立ち上がり時間（10%～90%）の速度整合された状態を満足しない。速度整合された幾何学的配置により、時間的分解は大きく改善される。

アルモファスガラスSF-59は、TGGのガラスと似た挙動を示す。図34は、5スキャンの平均応答を示す。最初のピーク（FWHM）の持続時間は、22ピコ秒の立ち上がり時間（10%～90%）で21ピコ秒である。小さい ΔI

$I \approx 5.8 \times 10^{-5}$ は、この材料の小さいヴェルデ定数と短い相互作用距離とによる。

SF-59センサーの長さは、TGGセンサーよりほぼ4倍短い。波形のリングは、主に、前述の同じ基準に起因する。TGGの全体的応答磁場の感度は、SF-59よりほぼ3倍大きい。

超高速磁気光学サンプリングは、自由に伝搬する磁気の過渡的信号を測定する斬新な手法を備えている。自由空間磁気光学サンプリングが、超高速サンプリングの世界に新しい分野を開くことは明白である。感度と帯域幅の増大により、自由空間磁気光学サンプリングは、テラHz磁気分光学のための理想的道具からなる。この手法は、磁気の過渡的電場のコヒーレントの測定を行い、増強された時間的、空間的分解により、磁気信号の位相と振幅の正確な情報を与える。また、この手法は、磁気の緩和と共振の研究、磁化転移とスピンドYNAMIKSの時間分解された研究、磁束誘導超伝導体の固有ダイナミクスの調査の他に、材料の透磁率と磁化率の調査の磁気の時間領域の分光学、及び前述の電気光学画像に対応する斬新な磁気画像に有用であると確信される。

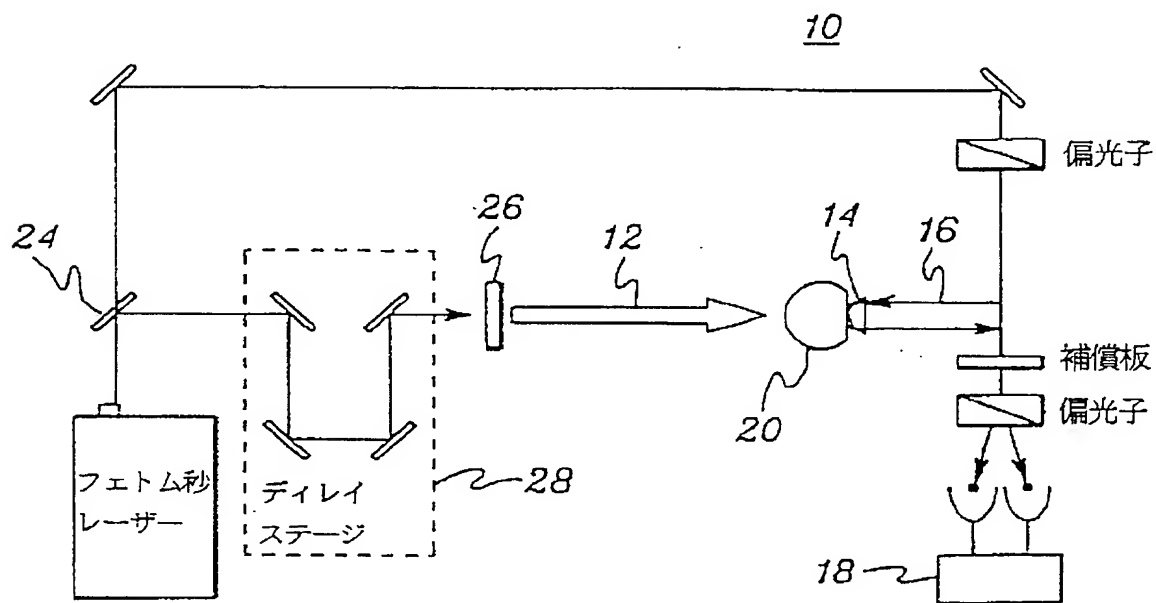
要約すると、電気光学的電場センサーのダイナミックレンジが、パルスの電磁波放射のコヒーレントの検出についてここに示されている。現存する光導電アンテナ法に比較して、本発明による自由空間電気光学サンプリングは、説明した電気光学

結晶と光検出器を用いることにより、振幅検出から時間的検出を分離している。この分離により、時間的分解と信号感度の両方の最適性能が達成される。自由空間電気光学の電場センサーにより、遠赤外の空間的、時間的画像を光学空間的そ

として時間的画像へ変換することが実現可能である。

本発明は、幾つかの好適な実施形態により、ここに詳細に述べられたが、多くの変形と変更が、当業者により行うことができる。従って、本発明の本来の精神に含まれるような包括的な変形と変更が、添付の請求の範囲により意図される。

【図1】



22

fig. 1

【図2】

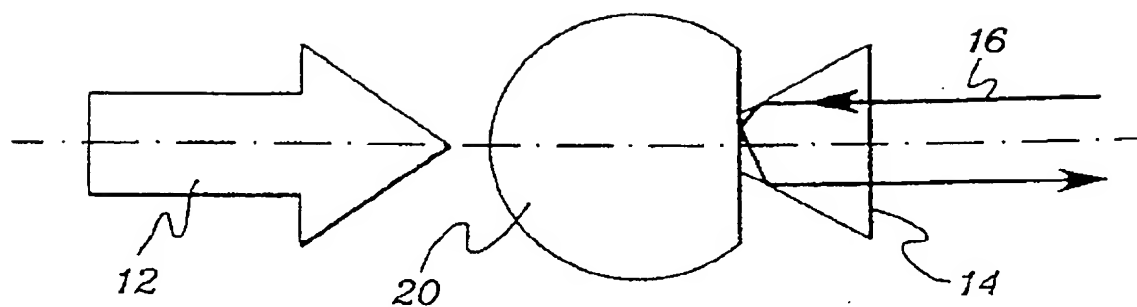


fig. 2

【図3】

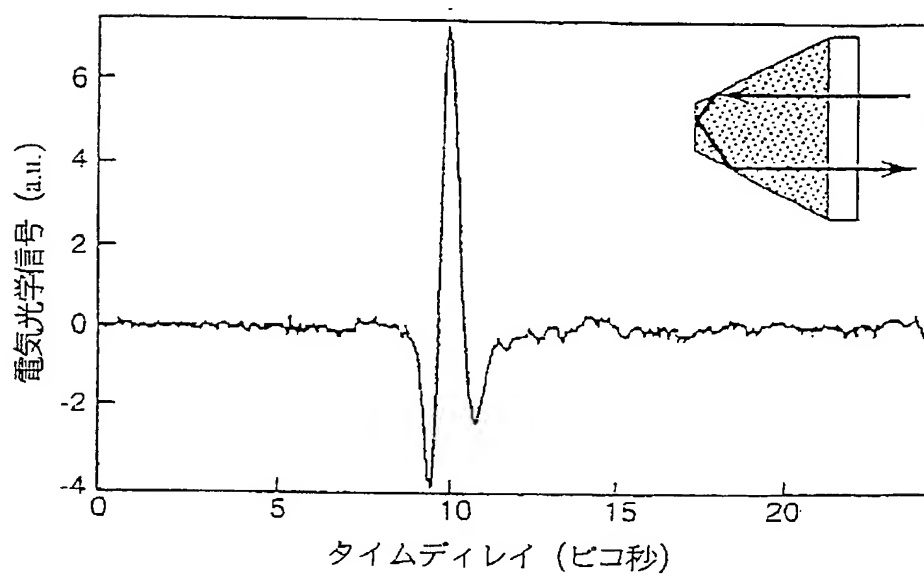


fig. 3

【図4】

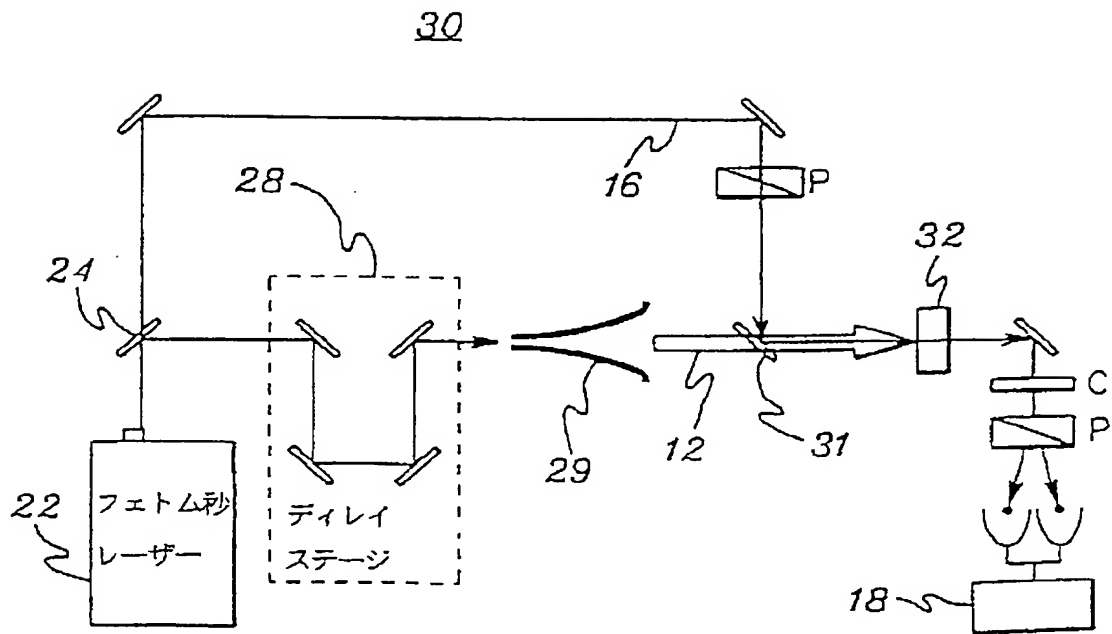


fig. 4

【図5】

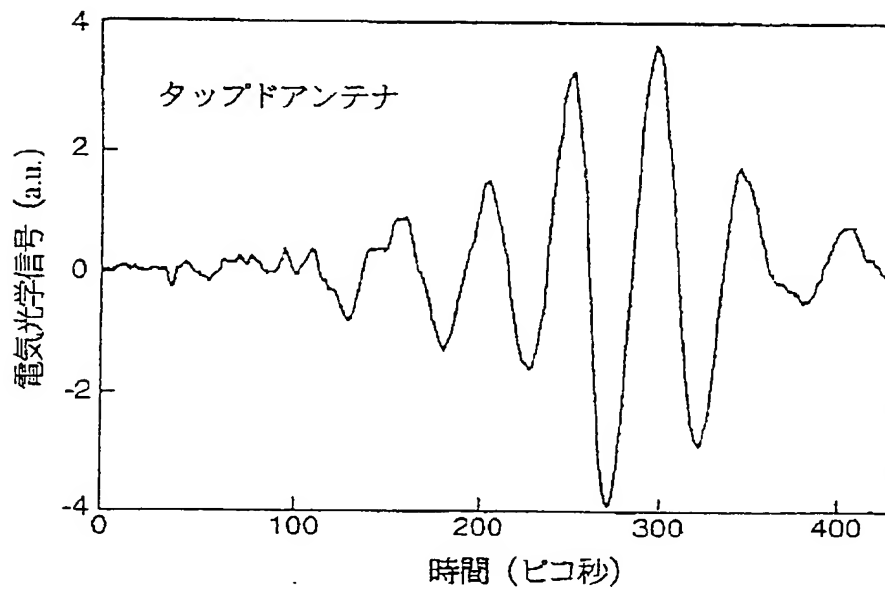


fig. 5

【図 6】

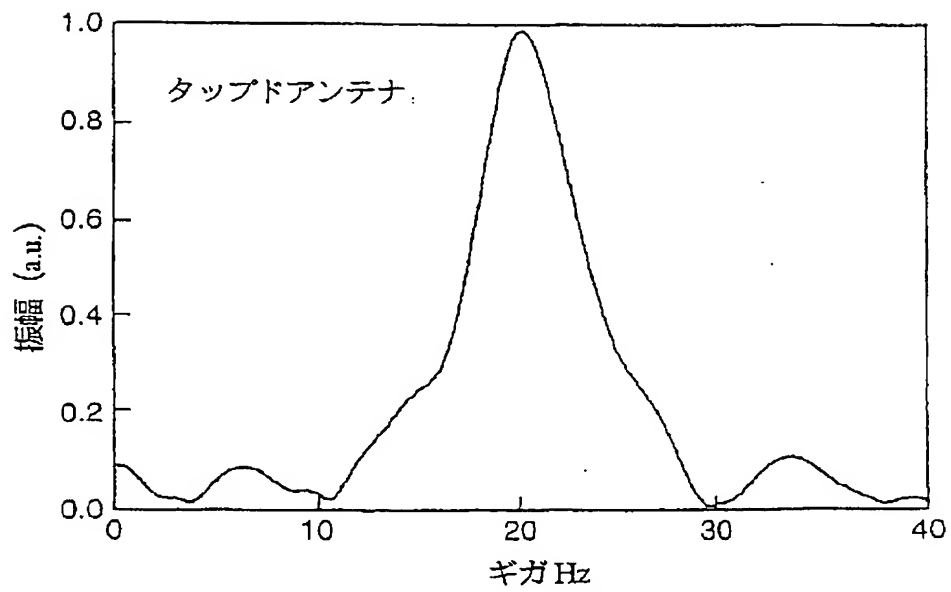


fig. 6

【図 7】

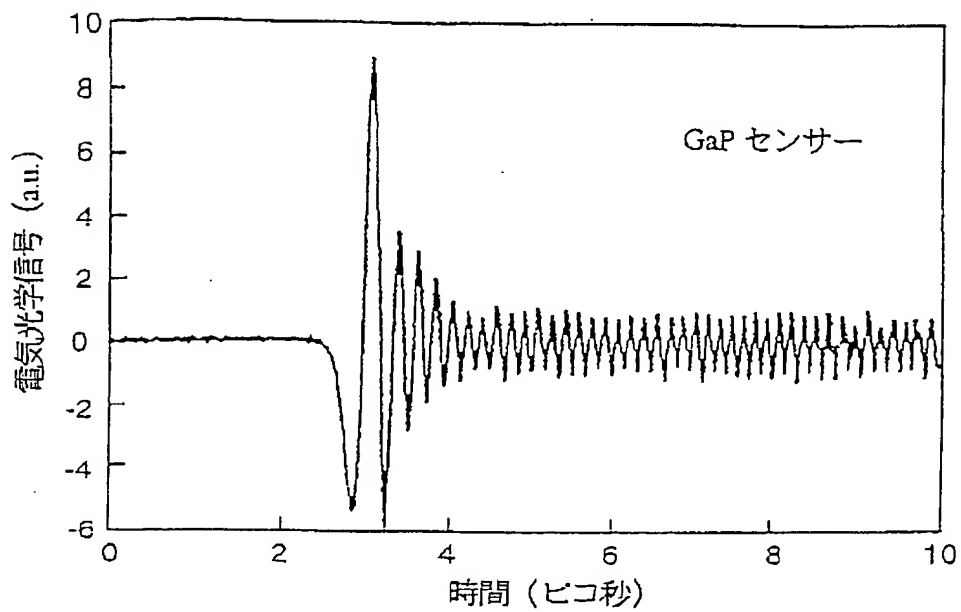
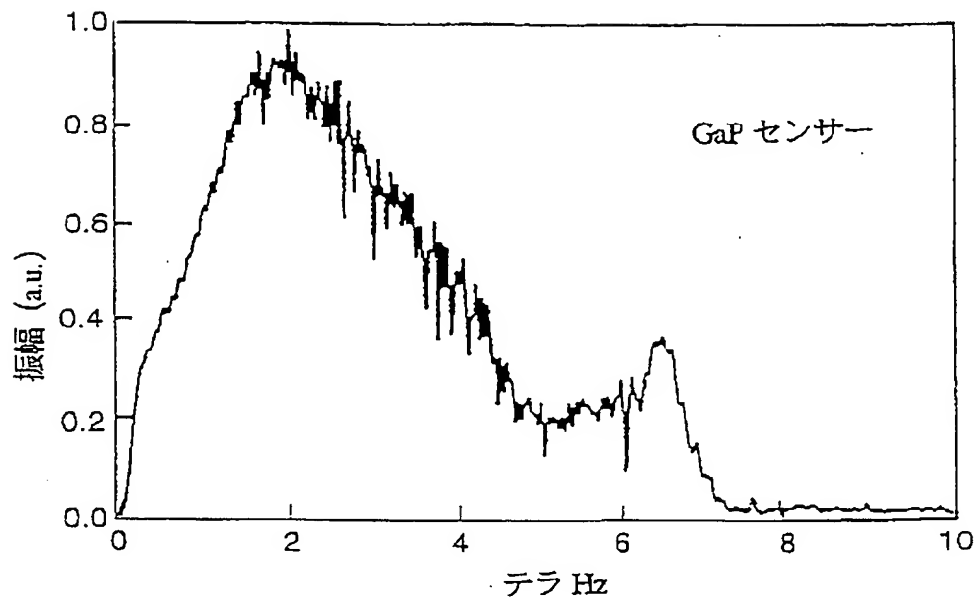
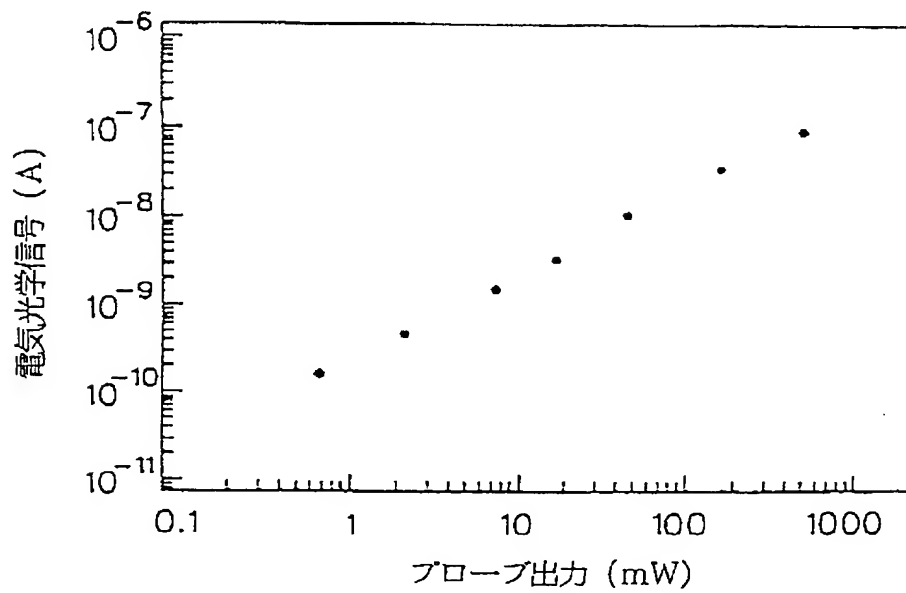


fig. 7

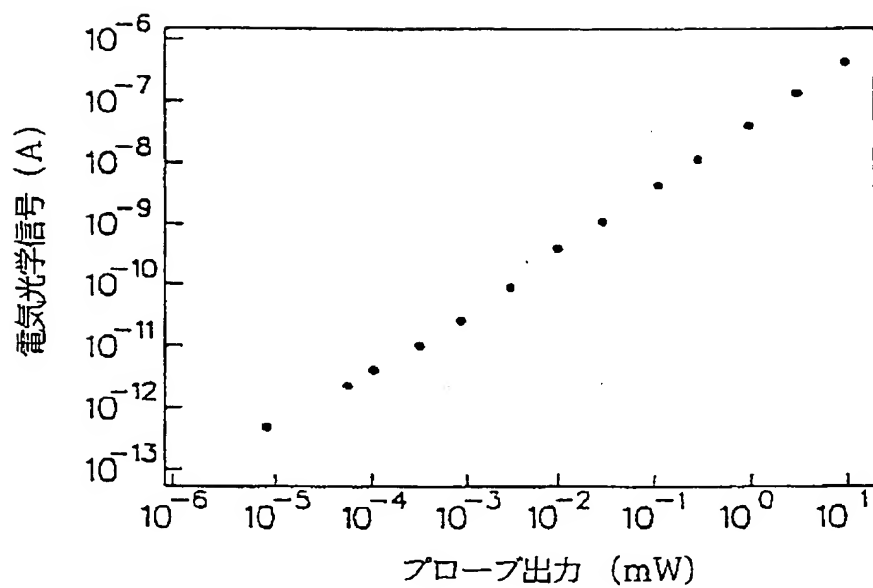
【図8】

*fig. 8*

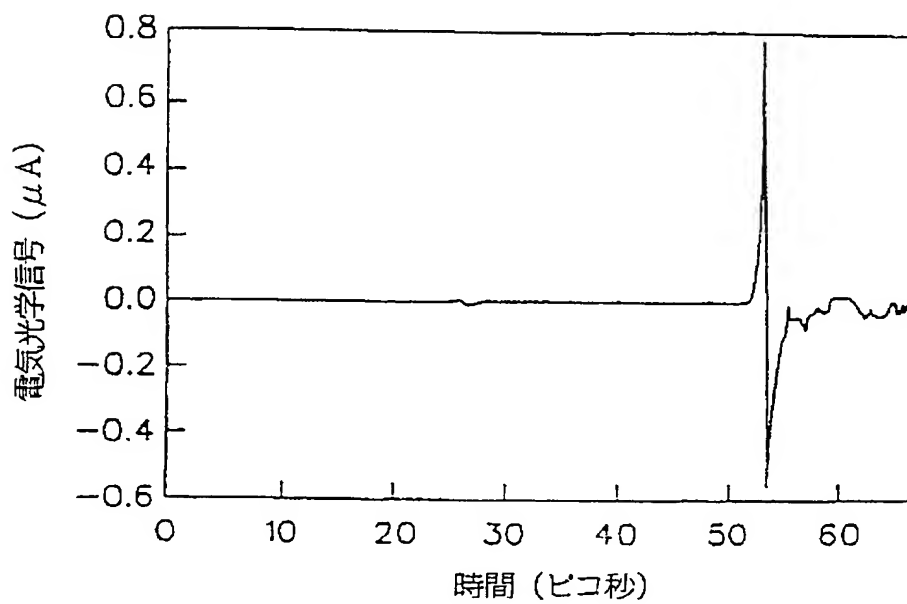
【図9】

*fig. 9*

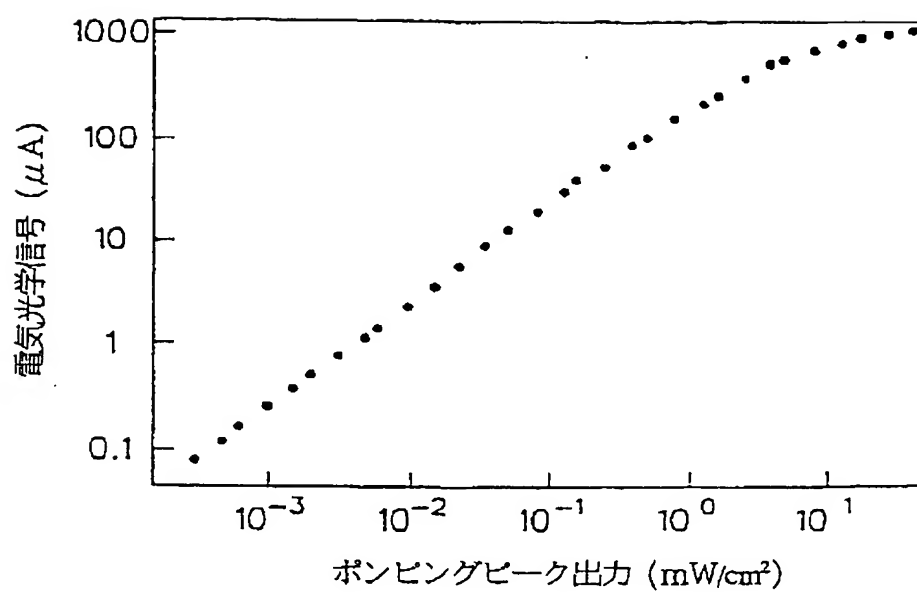
【図 10】

*fig. 10*

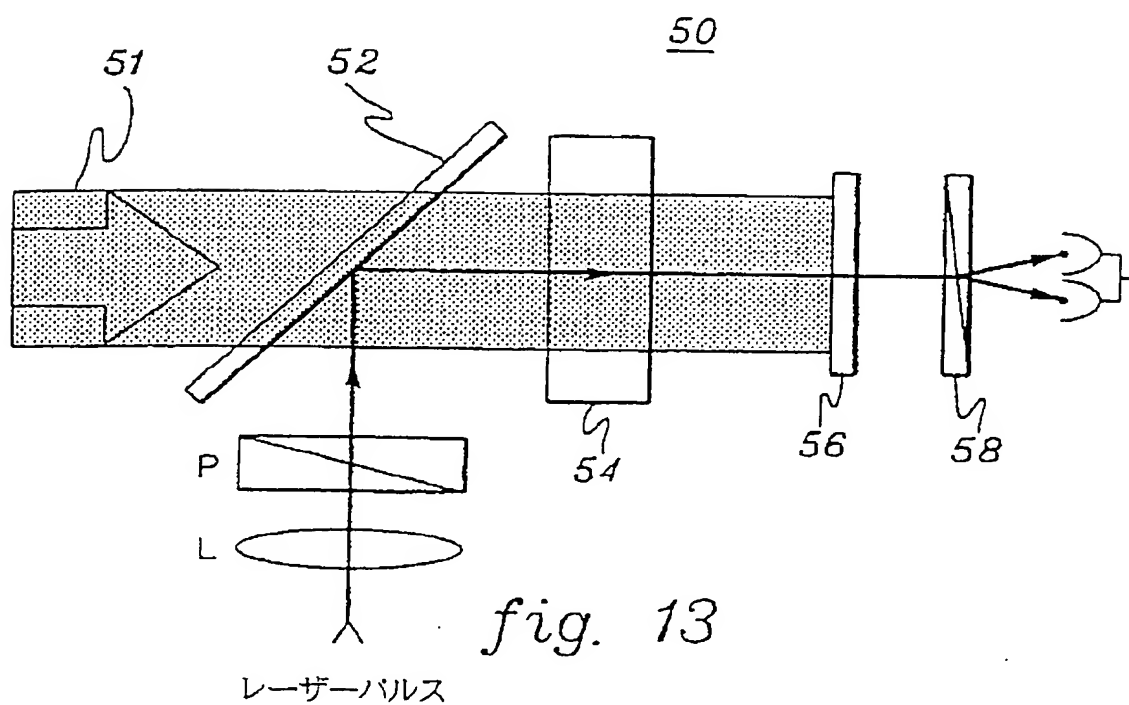
【図 11】

*fig. 11*

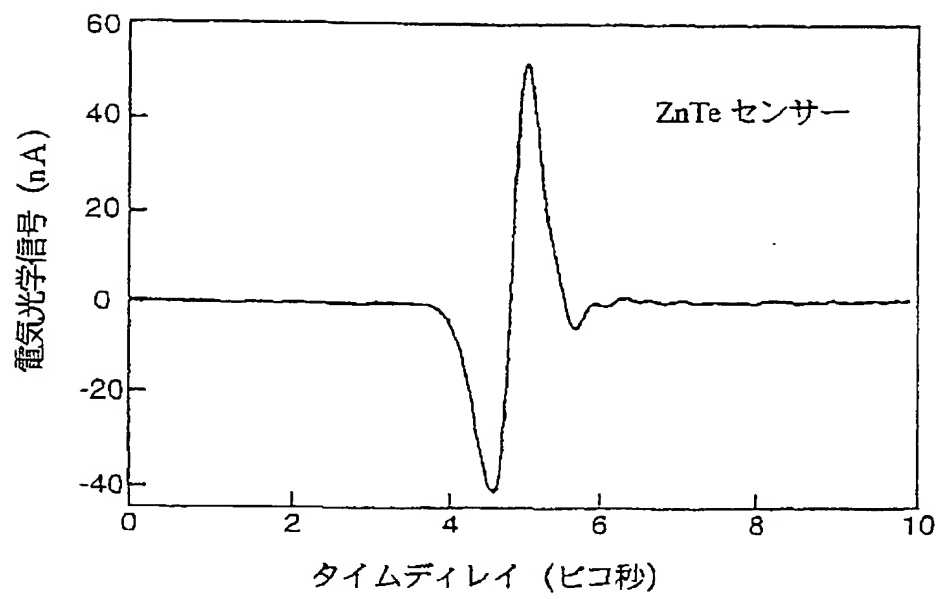
【図12】

*fig. 12*

【図13】

*fig. 13*

【図14】

*fig. 14*

【図 15】

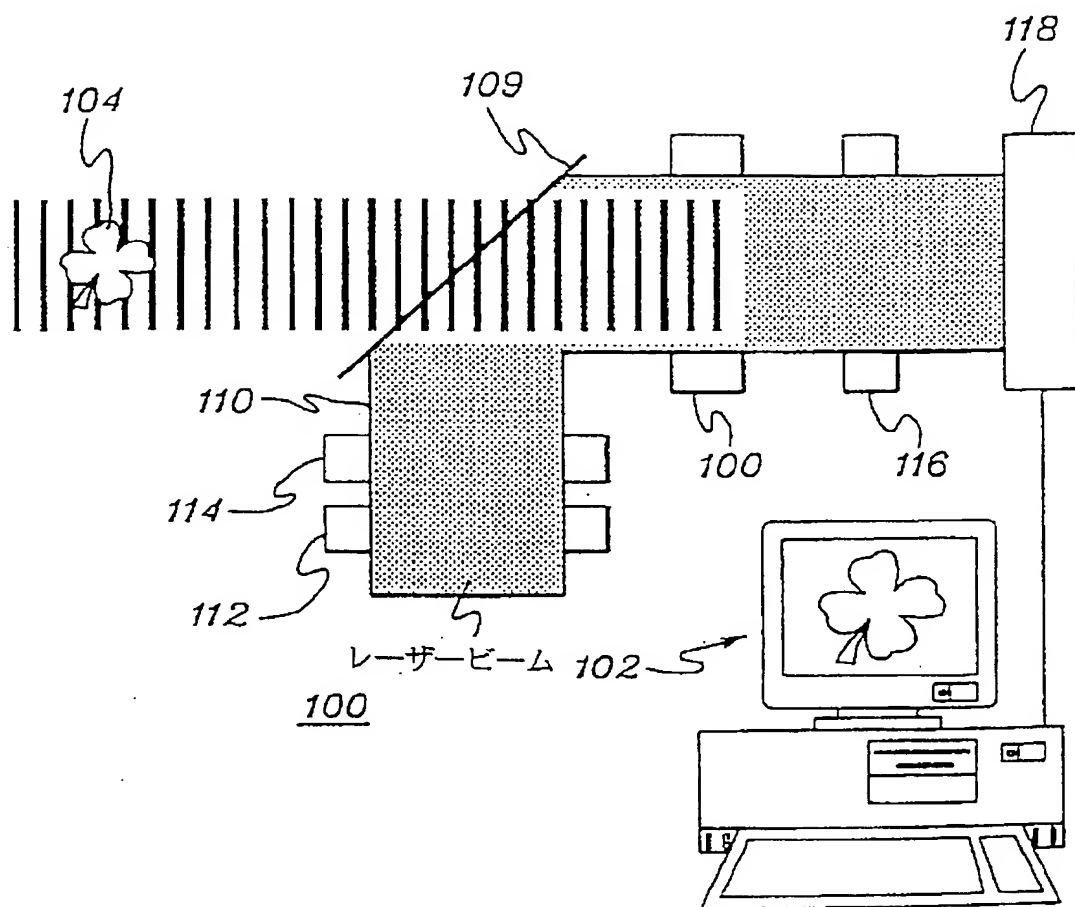


fig. 15

【図 16】

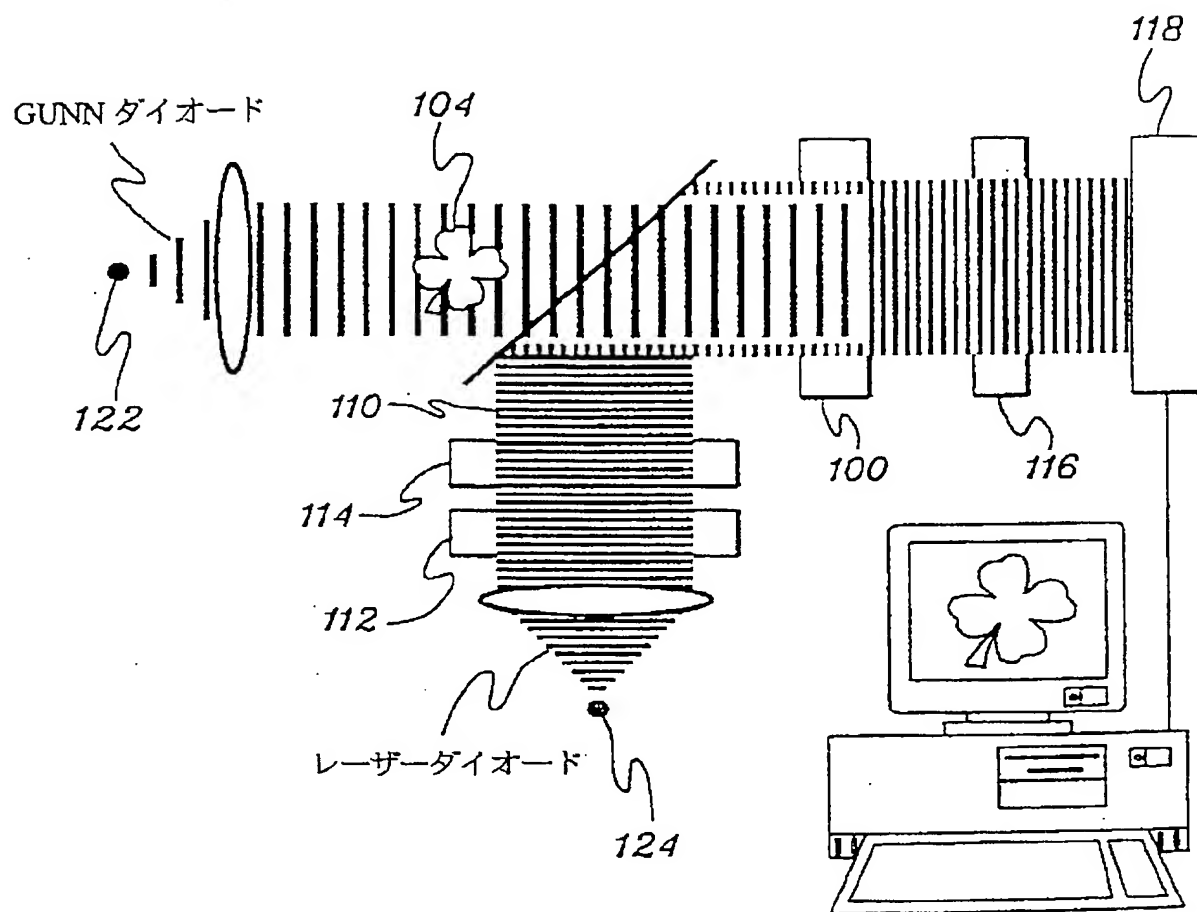


fig. 16

【図 17】

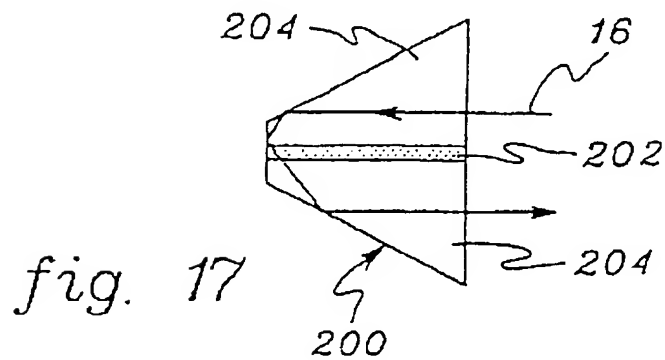
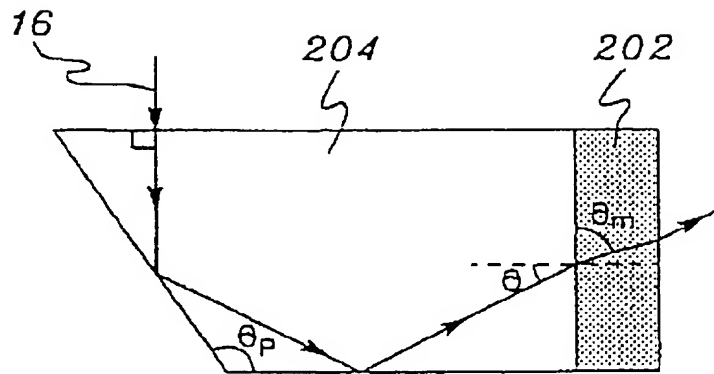
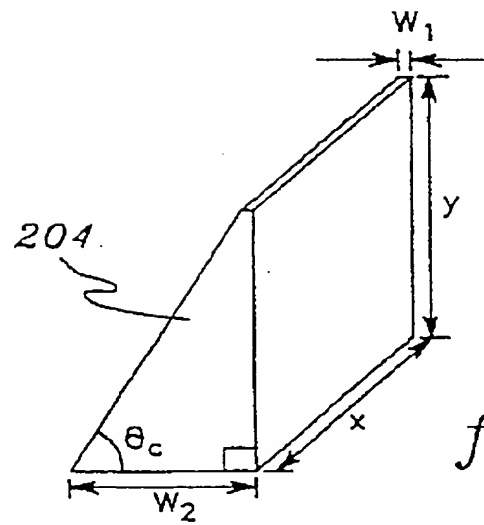


fig. 17

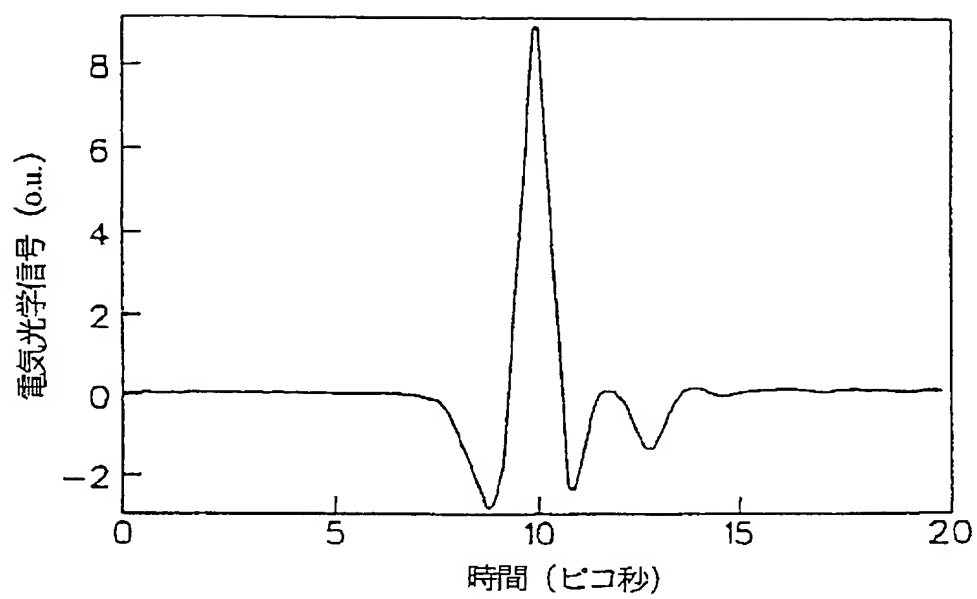
【図18】

*fig. 18*

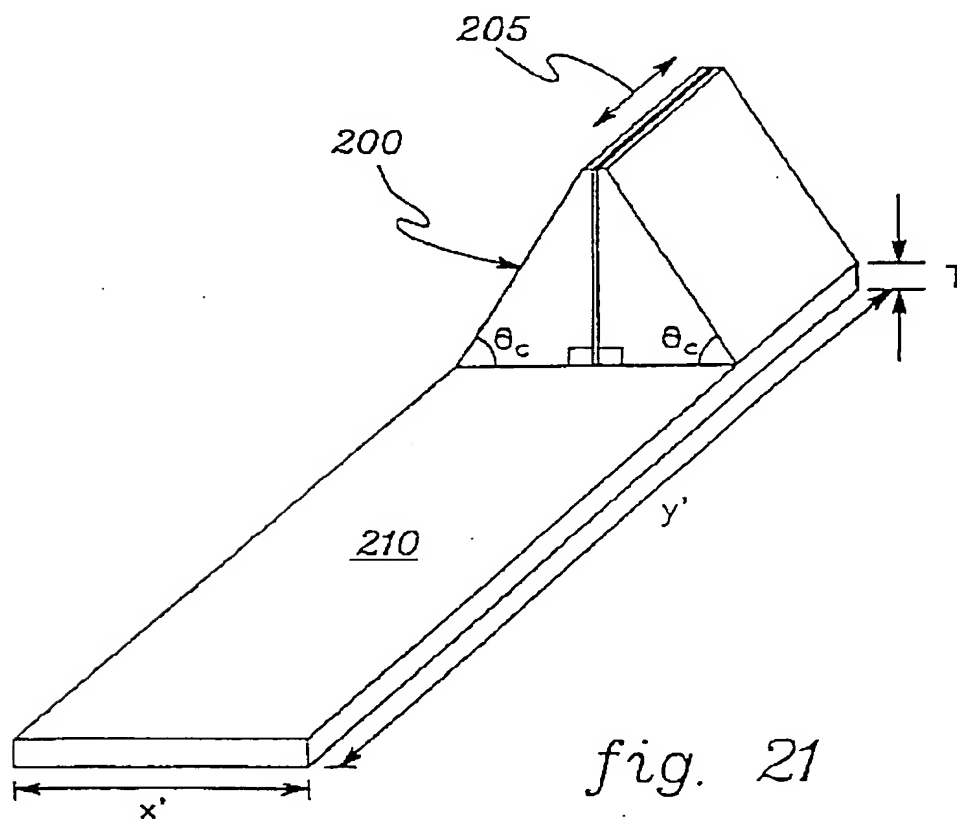
【図19】

*fig. 19*

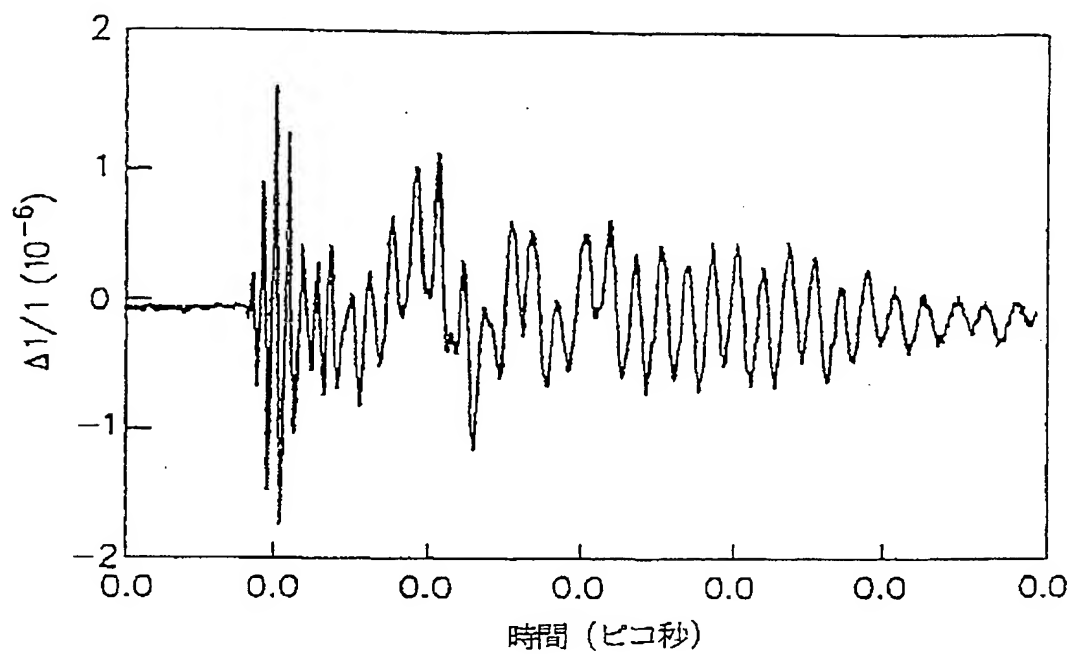
【図20】

*fig. 20*

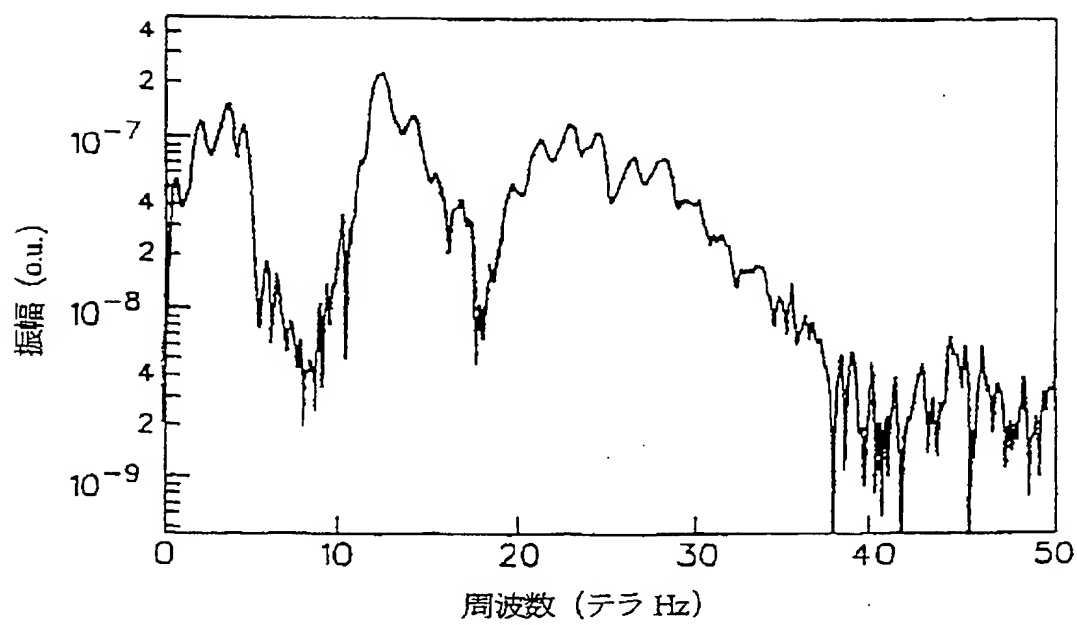
【図21】

*fig. 21*

【図22】

*fig. 22*

【図23】

*fig. 23*

【図 24】

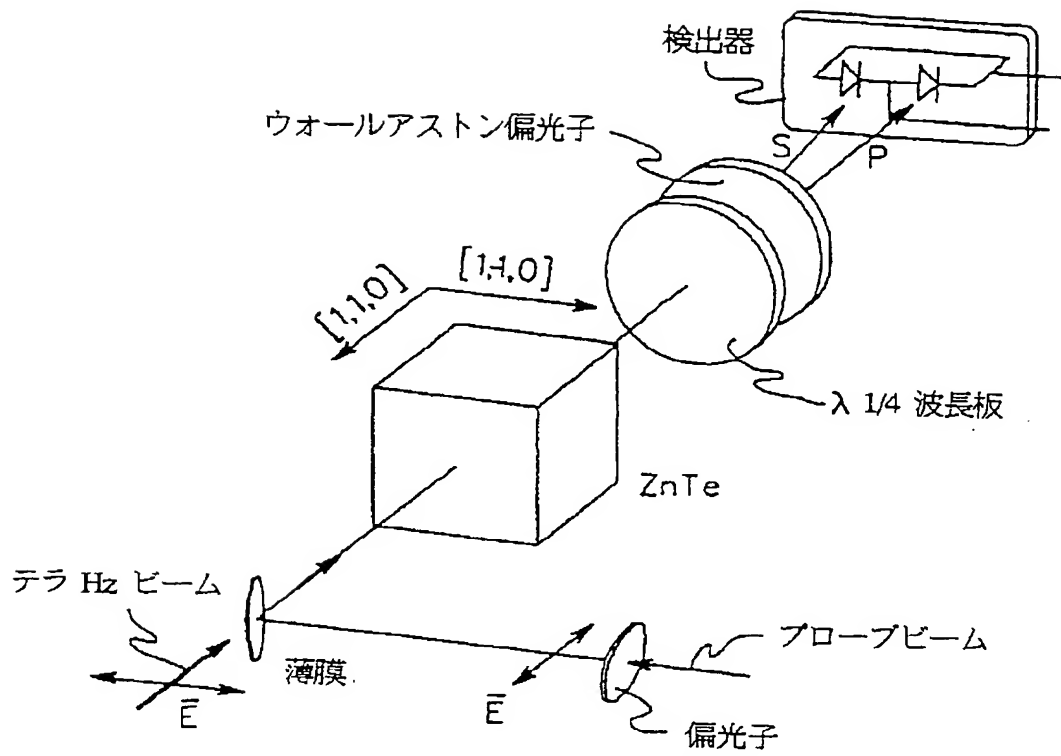
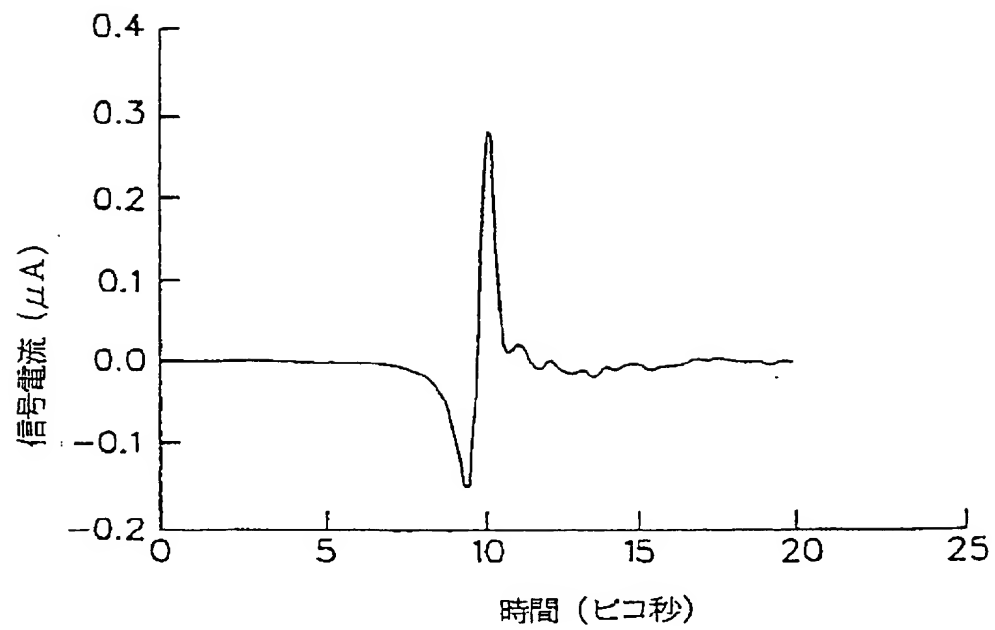


fig. 24

【図25】

*fig. 25*

【図 26】

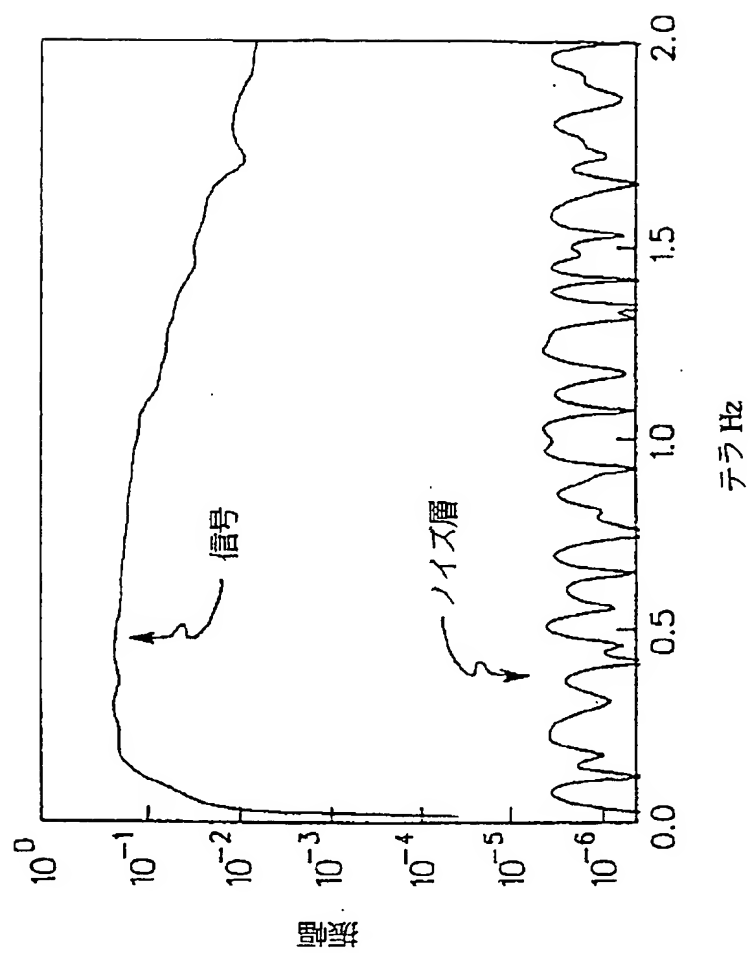
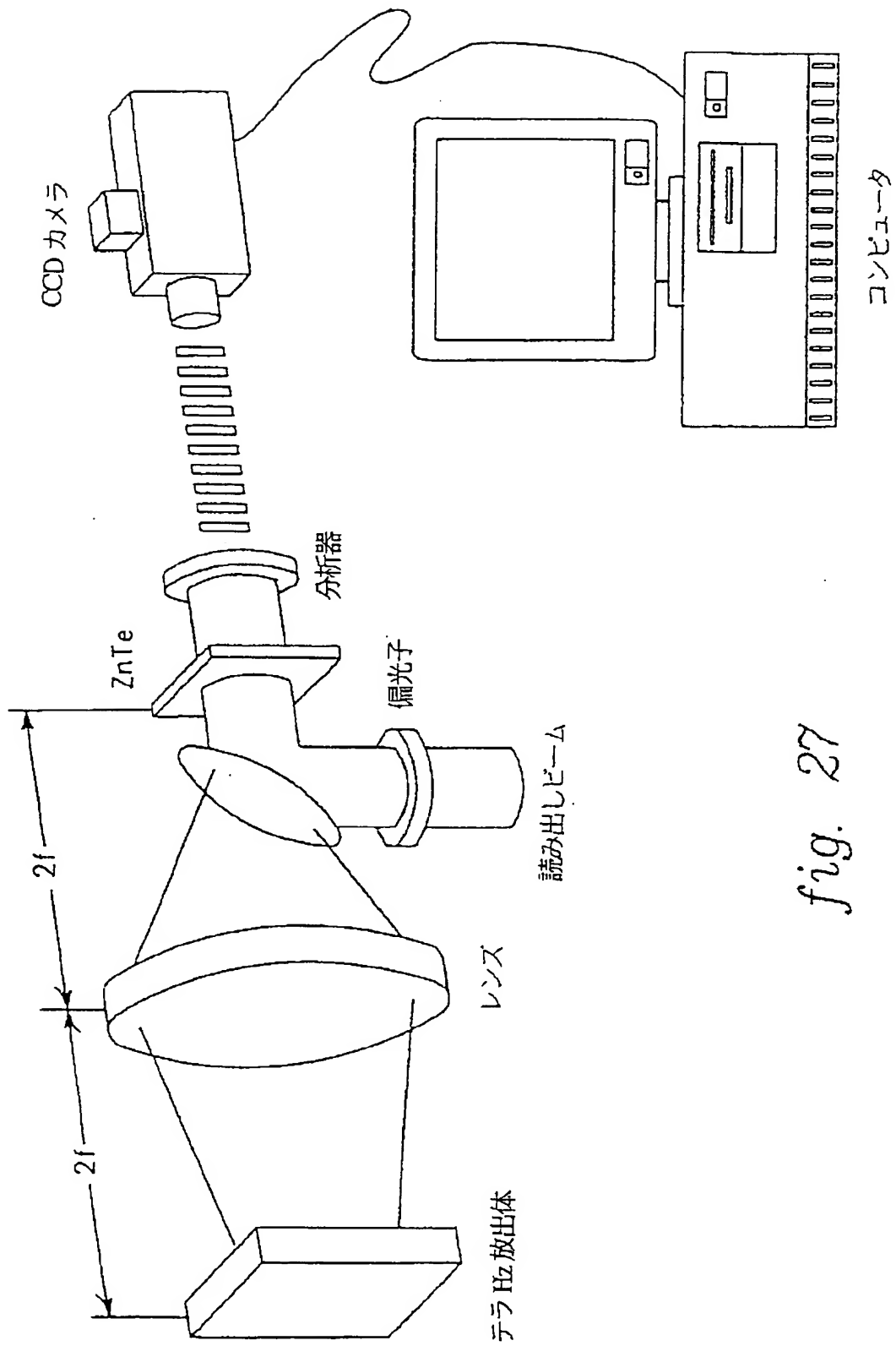


fig. 26

【図 27】



【図28】

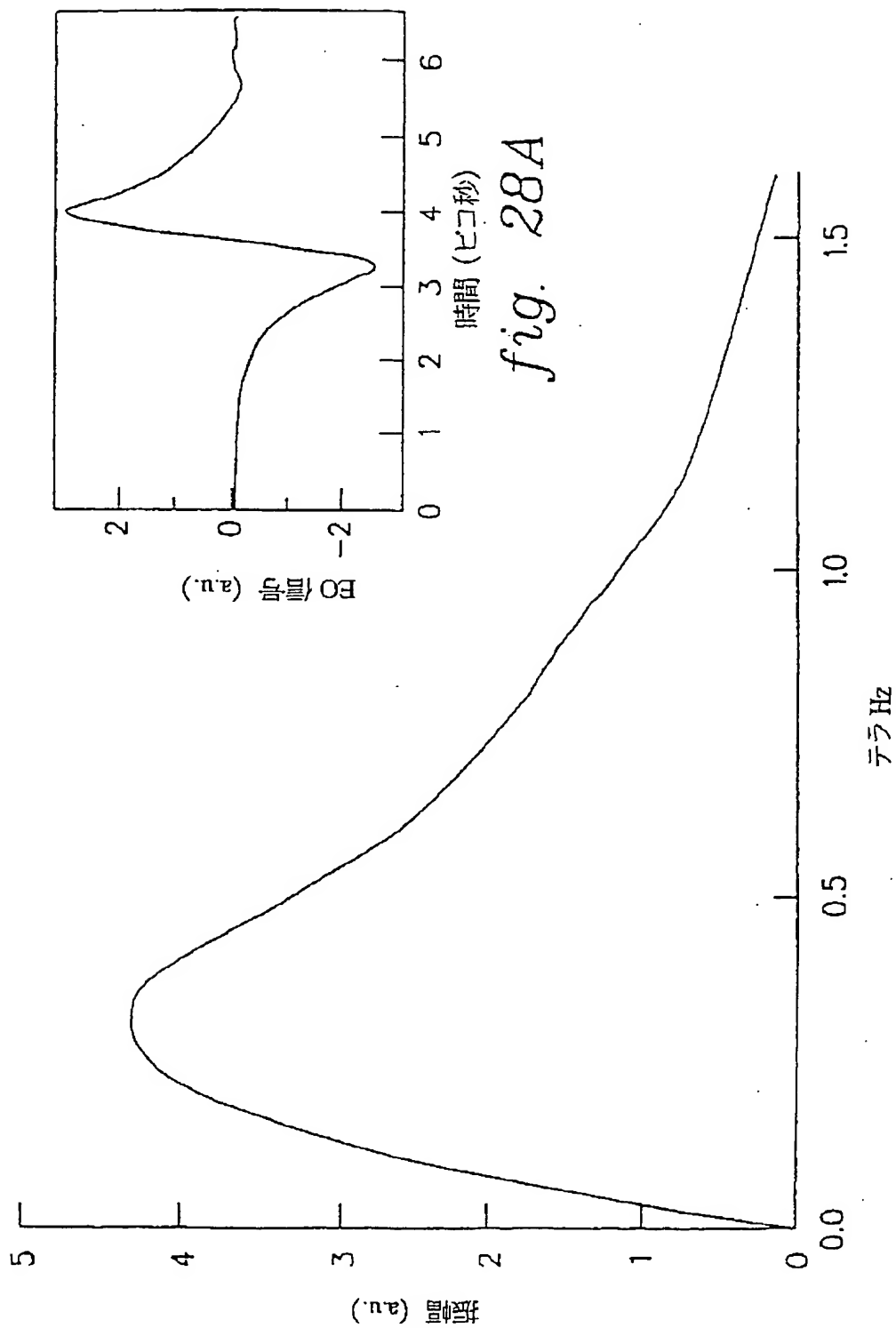
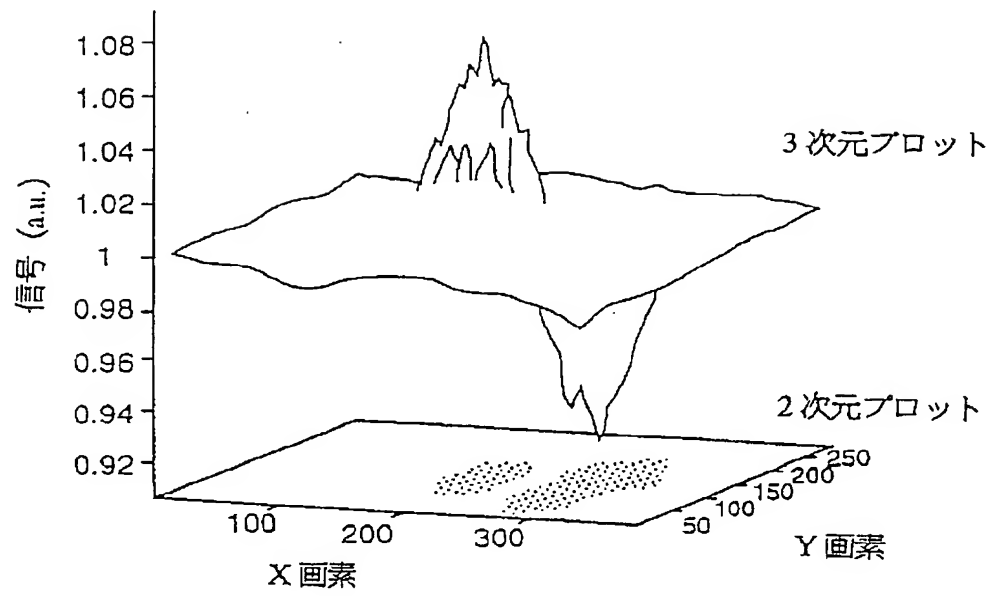
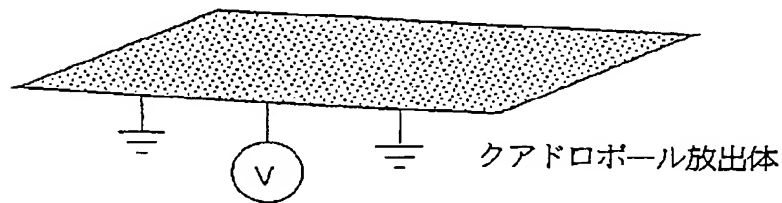


fig. 28A

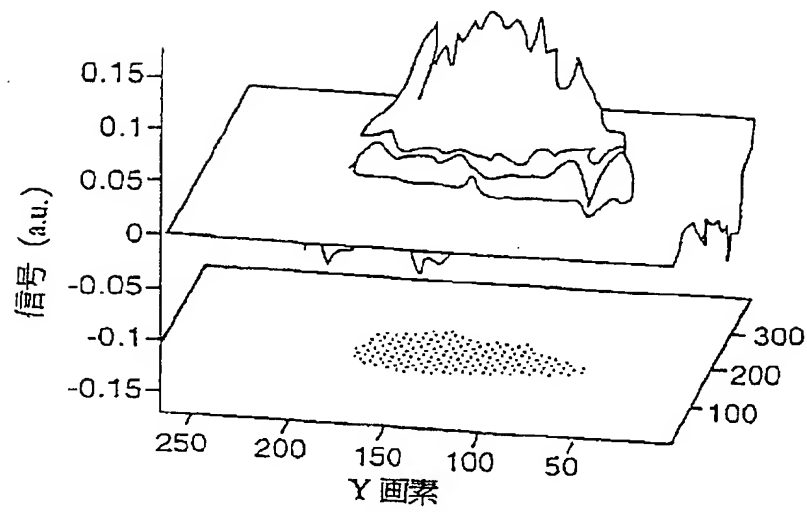
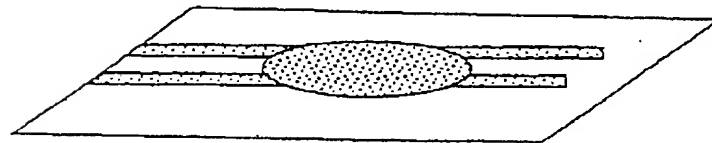
fig. 28

【図 29】

*fig. 29A**fig. 29*

【図30】

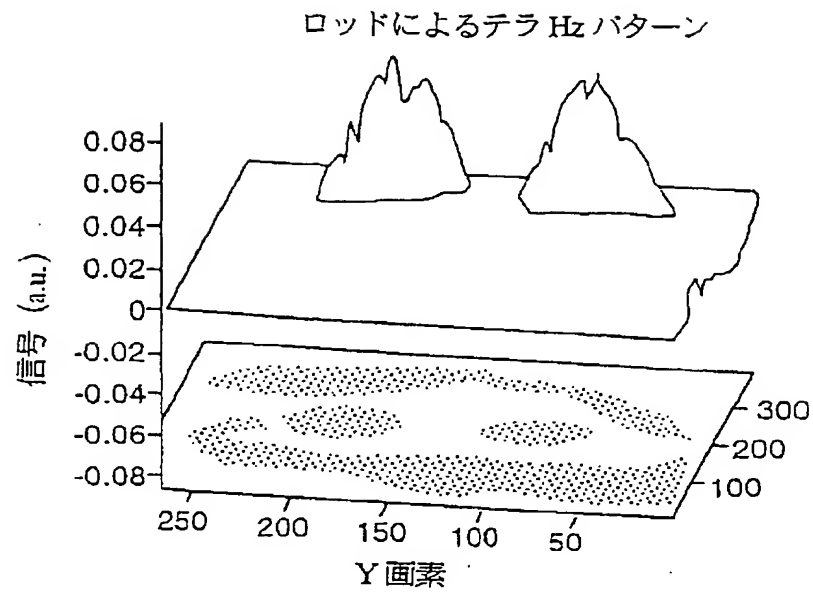
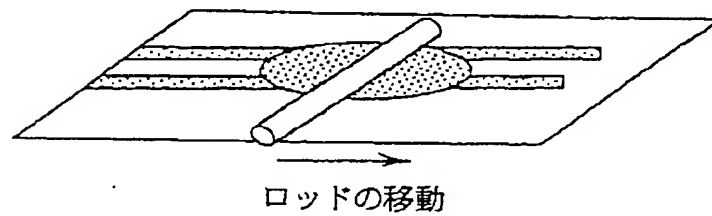
オリジナル テラ Hz パターン

*fig. 30A*

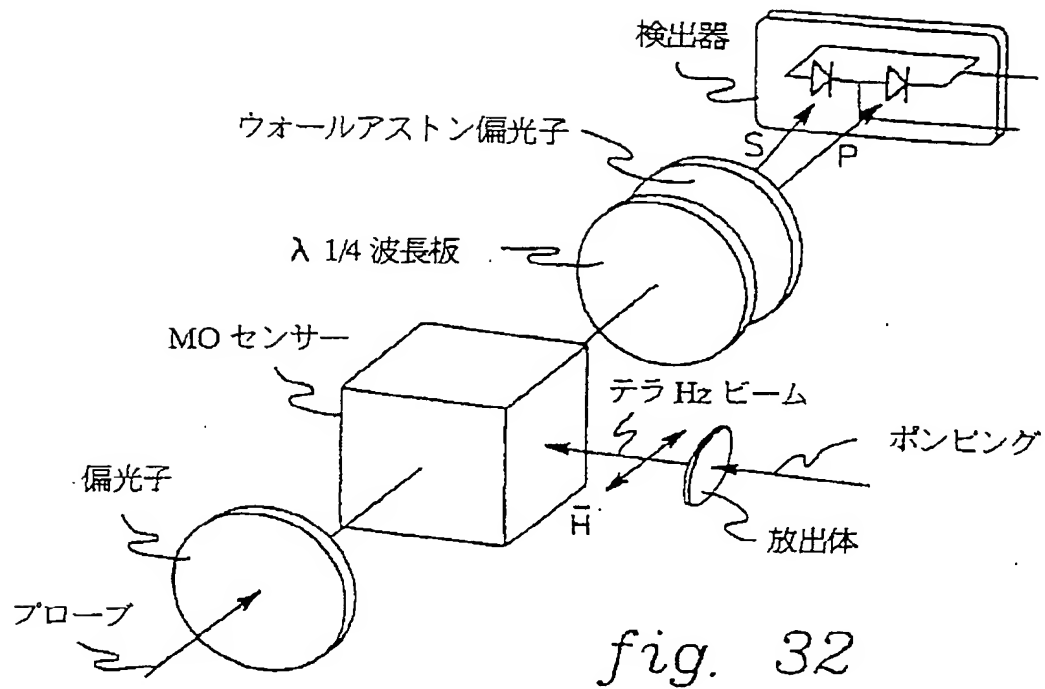
テラ Hz 放出体

fig. 30

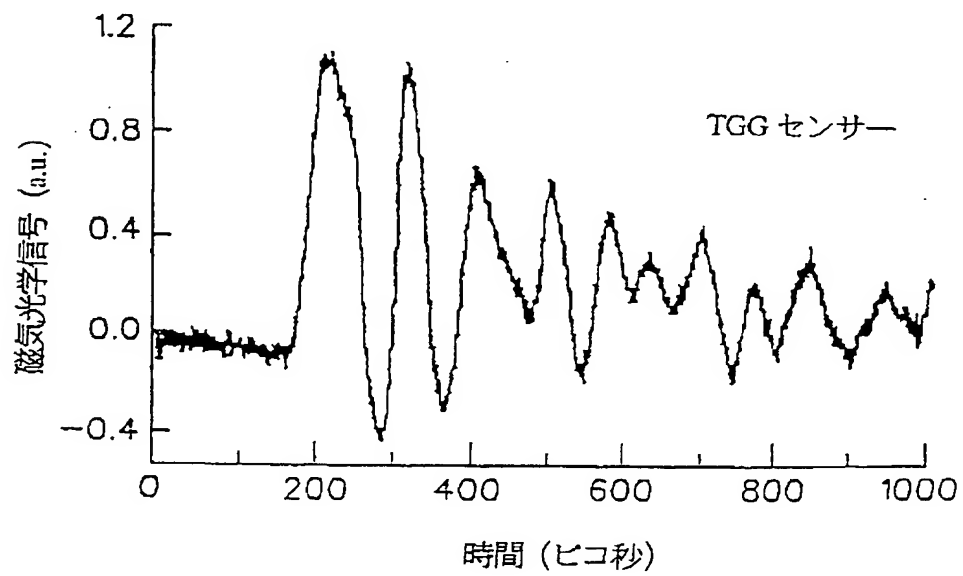
【図31】

*fig. 31A**fig. 31*

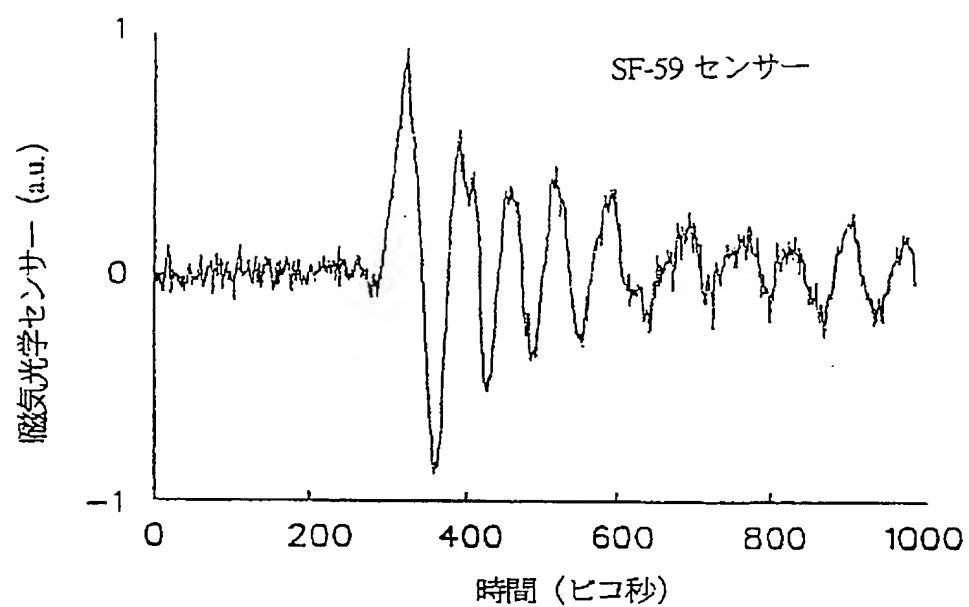
【図 32】



【図 33】



【図34】

*fig. 34*

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US97/09151

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC(6) : G01R 31/00, 33/00, 33/02; G02F 01/09 US CL : 324/96, 117R, 244.1; 359/280, 281, 283 According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) U.S. : 324/96, 117R, 244.1; 359/257, 280, 281, 283; 250/227.21, 225; 356/365, 368 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 4,446,425 A (VALDMANIS ET AL) 01 MAY 1984.	1-46
A	US 5,134,361 A (PILLOW) 28 JULY 1992.	1-46
A	US 5,256,968 A (LOUALICHE ET AL) 26 OCTOBER 1993.	1-46
A	US 5,281,912 A (TOGAWA) 25 JANUARY 1994.	1-46
A	US 5,450,006 A (TATAM) 12 SEPTEMBER 1995.	1-46
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "B" earlier document published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reasons (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "A" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 12 SEPTEMBER 1997		Date of mailing of the international search report 17 OCT 1997
Name and mailing address of the ISA/US Commissioner of Patents and Trademarks Box PCT Washington, D.C. 20231 Facsimile No. (703) 305-3230		Authorized officer <i>Russell M. Kobert</i> RUSSELL M. KOBERT Telephone No. (703) 305-4900

フロントページの続き

(31)優先権主張番号 08/859,478

(32)優先日 平成9年5月20日(1997.5.20)

(33)優先権主張国 米国(US)

(81)指定国 EP(AT, BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), CA, JP

(72)発明者 ウー, チー

アメリカ合衆国, 12180 ニューヨーク州,
トロイ, コンGRESS ストリート 523

(72)発明者 リオーダン, ジェニファー, アン

アメリカ合衆国, 11758 ニューヨーク州,
マッサビークア, オンタリオ アベニュー
117

(72)発明者 スン, フェングオ

アメリカ合衆国, 12180 ニューヨーク州,
トロイ, オーチャード アベニュー 6

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.